

中文引用格式:梅家林,杜志刚,钱志浩,等. 公路隧道视线诱导设施设计及评价研究综述[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(10): 124-130.

英文引用格式:MEI Jialin, DU Zhigang, QIAN Zhihao, et al. Review of design and evaluation of visual guiding devices for highway tunnels [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 124-130.

公路隧道视线诱导设施设计及评价研究综述^{*}

梅家林^{1,2}, 杜志刚^{1,2}教授, 钱志浩³, 焦方通⁴

(1 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063; 2 交通信息
与安全教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430063; 3 浙江路光科技
有限公司, 浙江 金华 321000; 4 山东理工大学 交通与车辆
工程学院, 山东 淄博, 255000)

中图分类号: X951

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1193

基金项目: 国家自然科学基金资助(52072291, 52302437); 山东省高等学校青创科技支持计划项目(2024KJH015)。

【摘要】 为提升公路隧道行驶安全水平, 减少因视线诱导设施设置不当导致的视线干扰与视觉负担, 提出公路隧道视线诱导设施设计及评价研究框架。首先, 系统回顾国内外相关文献, 分析不同类型视线诱导设施的设置效果及其设计参数, 明确其在凸显空间路权、保障视距和提升视觉舒适性等方面的关键功能; 其次, 归纳现有研究中用于评估设施有效性的数据获取方法与核心评价指标, 构建科学的评价体系; 最后, 梳理当前研究的主要局限, 并提出未来的研究方向。结果表明: 视线诱导设施可通过明确空间路权、提高有效视距与视区、降低视错觉等方式, 优化隧道内的视觉环境。设施类型与布设间距应综合考虑空间路权、曲率感知、速度感知及视觉舒适性等因素, 进行合理配置; 实车试验与室内仿真试验是探索设施设计参数与优化策略的关键手段, 结合现场观测和事故数据分析可进一步验证其应用效果; 视觉感知、视觉特性、生理特性与驾驶行为等可作为核心评价指标, 基于多指标的交互分析有助于深入揭示视线诱导设施对驾驶行为的调控机制。

【关键词】 公路隧道; 视线诱导设施; 设施设计; 评价体系; 行驶安全

Review of design and evaluation of visual guiding devices for highway tunnels

MEI Jialin^{1,2}, DU Zhigang^{1,2}, QIAN Zhihao³, JIAO Fangtong⁴

(1 School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology,
Wuhan Hubei 430063, China; 2 Engineering Research Center of the Ministry of
Transportation Information and Safety Education, Wuhan Hubei 430063, China;
3 Zhejiang Luguang Technology Co., Ltd., Jinhua Zhejiang 321000, China;
4 School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of
Technology, Zibo Shandong 255000, China)

Abstract: In order to enhance driving safety in highway tunnels and to reduce visual distraction and burden caused by improperly designed visual guiding devices, a research framework for the design and

evaluation of tunnel visual guiding devices was proposed. A systematic review of domestic and international literature has been conducted to analyze the effectiveness and design parameters of various types of visual guiding devices, and to clarify their key functions in delineating spatial right-of-way, ensuring adequate sight distance, and enhancing visual comfort. In addition, current studies were reviewed to summarize data acquisition methods and core evaluation indicators, thereby constructing a scientific evaluation system. The limitations of existing research were also identified, and future research directions were proposed. The results show that visual guiding devices can optimize the tunnel visual environment by clarifying spatial right-of-way, increasing effective sight distance and visual fields, and mitigating visual illusions. The type and spacing of devices should be determined based on spatial right-of-way, curvature perception, speed perception, and visual comfort. Real-vehicle experiments and indoor simulations serve as key approaches for exploring design parameters and optimization strategies, while field observations and accident data analysis can further validate their effectiveness. Indicators such as visual perception, visual characteristics, physiological responses, and driving behavior are suggested as core evaluation metrics. Moreover, multi-indicator interaction analysis may help reveal the mechanisms by which visual guiding devices influence driver behavior.

Keywords: highway tunnels; visual guiding devices; device design; evaluation system; driving safety

0 引言

近年来,公路隧道路段一直是交通事故高发区,给其正常运行带来了巨大挑战。研究表明:隧道出入口区域是事故的高发地段,主要形态为追尾碰撞和撞击隧道壁等,造成这种现象的主要原因为超速和天气^[1]。此外,工作日、白天时段、超速驾驶以及疲劳驾驶等因素,也进一步加剧了隧道事故的严重性^[2]。隧道洞口视觉环境的剧烈变化,显著影响驾驶人对车速、车距和方向的判断,易导致超速、车距不足和操作失误^[3]。隧道内单调的视觉环境容易降低驾驶人的注意力,增加疲劳感,削弱速度感知,从而提升了追尾风险^[4-5]。针对上述人因致灾机制,视线诱导设施作为主动干预手段,在提升行车安全与光环境质量方面具有关键作用。

近年来,国内外学者围绕隧道视线诱导设施的设计参数及应用效果开展了大量研究。部分研究聚焦于视线诱导设施的类型及作用机制,如突起路标^[6]、轮廓标^[7]、轮廓带^[8]等在引导视线、缓解视觉疲劳中的功能。在评价方法方面,多采用视觉、心理、生理指标结合驾驶模拟仿真平台和实车试验分析驾驶心理及行为特征^[8-9]。尽管已有研究为隧道视线诱导设施的设计提供了理论基础,但在设施组合方式、参数设计和改善机理等方面仍缺乏系统研究;尤其是在设施优化与效果评价上,仍缺少统一、科学的指标体系和方法路径。

鉴于此,笔者系统梳理现有研究,归纳设施参数,探讨改善机制,并构建科学的评价体系,以优化公路隧道视线诱导设施的设计与应用。

1 隧道视线诱导设施设计与评价研究框架

基于近年国内外相关研究,构建隧道视线诱导设施的设计与评价框架,如图 1 所示。

2 公路隧道视线诱导设施设计

2.1 设施类型及设置参数

1) 突起路标。固定于路面,用于勾勒车道与道路边缘,可以提升诱导效果并增强车辆横向控制能力,进而提升行驶安全性^[6]。突起路标可增强驾驶人对道路曲率的感知,但其有效性受设置间距的影响。部分研究基于曲率感知与视觉连续性优化其间距,建议视野内至少出现 6 个突起路标^[10]。此外,突起路标还能使车辆碾压时产生振动感以提醒驾驶人,因此可通过振动警示效果确定设置间距。在隧道路段,突起路标有助于降低驾驶人心理与生理负荷,增强速度调控及车辆操控能力,但在曲线段可能增加事故风险^[11]。

2) 轮廓标。安装于隧道侧壁或检修道路缘,用于指示道路方向和边界。尽管轮廓标对路面照度、亮度及小目标可见度影响有限,但具备显著的视线

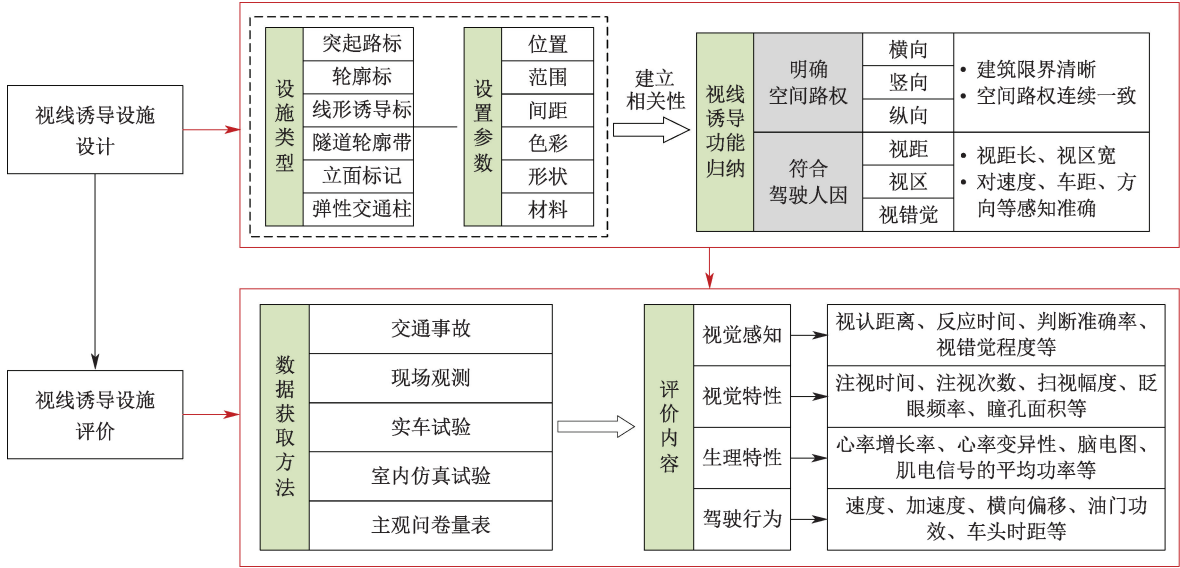


图 1 公路隧道视线诱导设施设计与评价研究框架

Fig. 1 Research framework for design and evaluation of visual guiding devices in highway tunnels

引导作用,且侧壁与路缘同时设置时效果更佳^[7]。与突起路标类似,轮廓标的间距需考虑曲率感知精度与视觉连续性。其主要依靠车灯逆反射显示检修道及洞壁轮廓,因此,设置位置、大小及间距直接影响驾驶人的视觉体验与感知判断。隧道侧壁中部及高部过密设置轮廓标易引发明暗变化,可能导致视觉不适与心理干扰。

3) 线形诱导标。广泛应用于弯道,以提供清晰的道路指引。早期研究表明,为满足驾驶人对曲率感知的需求,视野内需连续设置至少 4 个线形诱导标^[12]。研究显示,该设施可显著降低弯道车速,促使驾驶人保持车道,减少碰撞事故^[13]。

4) 隧道轮廓带。设置于隧道侧壁的线条状设施,通常采用高反光材料,可分为反光环(环形轮廓带)和反光条(条形轮廓带)。樊兆董等^[8]发现,隧道内 200 m 间距的反光环能提升驾驶稳定性,集中注意力并降低心理紧张感,其效果优于 300 和 400 m 间距。杜志刚等^[14]指出,隧道弯道中,驾驶人视野内可见 3 个反光环时,能显著减少弯道错觉。梅家林等^[15]提出隧道反光条可提高驾驶人的速度感知和距离感知能力,降低追尾风险,并根据其对车距保持的影响确定最佳设置范围。

5) 立面标记。该类标记为黄黑相间的倾斜线条,通常采用黄黑铝背基材料,广泛应用于洞门和检修道路缘,以提高隧道行驶空间的辨识度。黄婷等^[16]发现,相较于矩形标记,隧道洞口环形立面标记能提升夜间视认距离和判别准确率。WAN

Hongliang 等^[17]指出,隧道侧壁路缘红白组合标记相较于蓝白和绿白更能提升驾驶人的速度感知能力。

6) 弹性交通柱。设置在隧道洞口外的护栏与道路边线之间的弹性交通柱,能够显著降低驾驶人的心理负担,促使车辆减速行驶,并使车辆行驶的横向位置更靠近车道中心线,设置弹性交通柱的交通状况明显优于未设置弹性交通柱的情况^[18]。针对单洞双向公路隧道,弹性交通柱作为中央隔离设施能够有效降低车速离散度。

2.2 视线诱导功能

视线诱导设施作为隧道内除灯具和标线外的主要视觉参照物,起到了指示道路线形、方向、车道边界及危险路段位置的关键作用,从而明确道路的空间路权。为确保行驶安全,驾驶人需满足视距、速度感、距离感、方向感和位置感等安全需求^[3]。因此,视线诱导设施的核心功能在于明确道路的空间路权,使设计更符合驾驶人预期,从而降低驾驶难度,提升驾驶舒适性,最终提高道路安全性。

1) 明确空间路权。在隧道环境中,通行权主要表现为空间路权,即车辆合法行驶的宽度、长度(距离)和高度。空间路权可分为横向路权、竖向路权和纵向路权,分别对应车辆行驶的横向宽度、纵向距离和竖向高度^[19]。横向路权主要通过路面标线、突起路标、路缘轮廓标等设施提供清晰的车道信息,防止车辆轨迹偏移,避免与相邻车辆或路侧障碍物碰撞。竖向路权主要依靠隧道洞门立面标记、轮廓标、

轮廓带等设施,提供洞门、检修道、侧壁和洞顶等隧道各部分的轮廓信息,从而避免车辆碰撞隧道结构。纵向路权主要通过突起路标、轮廓标、轮廓带等设施提供连续一致的线形引导信息,增加有效视认距离,增强对弯道路段曲率的感知,帮助驾驶人提前识别前方环境并作出判断。

2) 符合驾驶人需求。在隧道昏暗封闭的环境中,视线诱导设施能提供比路面更远的视认距离,帮助驾驶人提前观察前方隧道的交通环境,从而优化视距。作为明亮的反光标识,视线诱导设施能够吸引驾驶人注意力,增强对隧道轮廓及路侧障碍物的识别,扩大注视范围,优化视区。与照明设施提供的背景光不同,视线诱导设施通过提升局部亮度和对比度,提供轮廓光,成为隧道内主要的视觉参照物,满足驾驶人的速度感、距离感、方向感和位置感,显著减少视错觉,从而提升行驶安全。

3 公路隧道视线诱导设施评价体系

3.1 数据获取方法

1) 交通事故统计。事故统计分析主要基于实际发生的交通事故,通过比较改善措施应用前后的数据评估其有效性。常用评估指标包括事故发生频次、死亡人数、受伤人数和经济损失等因素。为减少交通流量和道路里程的影响,常使用百万车公里事故率、死亡率和伤亡率进行评价。然而,由于交通事故数据难以获取且信息分散,结合事故进行数据评估设施应用效果面临较大困难。

2) 现场观测。在交通设施区域应用测速仪、雷达测速仪和便携式交通流分析仪等设备,可收集车速、加速度、车头时距和车头间距等参数。随着监控设备和图像识别技术的发展,视频数据采集成为重要手段。随着智能交通的发展,毫米波雷达广泛应用于交通领域,通过路侧雷达探测并连续跟踪车辆,实时获取其位置和速度数据。

3) 实车试验。实车试验是在实际道路环境中使用真实车辆进行试验,主要研究驾驶人在各种交通场景中的行为反应与行驶安全性。车辆上可搭载全球定位系统或北斗卫星导航、加速度计、行车记录仪、摄像机、车载诊断、双目相机、雷达传感器等数据采集设备,获取车辆及周围车辆的运动状态数据。对于驾驶人的心理和生理特征,通常通过眼动仪、心率带和脑电仪等设备采集视觉、心率和脑电等数据。

4) 室内仿真试验。现场观测和实车试验通常成本高且实施困难,故可通过图片、视频或简易设备

模拟道路场景,分析视认距离、判断准确率和反应时间等指标来验证设施的有效性。随着计算机仿真技术的发展,越来越多的研究采用驾驶模拟器分析不同场景下的驾驶行为。

5) 主观问卷量表。主观问卷用于调查驾驶人在行车过程中的感受,以评价行车环境的安全性和舒适性。常见驾驶负荷调查方法包括多维度综合评估量表 (National Aeronautics and Space Administration-Task Load Index, NASA-TLX)、单维度主观评估量表 (Rating Scale Mental Effort, RSME)、主观评估量表 (Subjective Workload Assessment Technique, SWAT) 和驾驶活动负荷指数 (Driving Activity Load Index, DALI) 量表,其中 NASA-TLX 因简单易行而广泛被应用^[20]。此外,研究人员可通过定制问卷收集驾驶人对驾驶难度、设施必要性等主观评价^[21]。由于个体差异影响较大,主观评价通常需要与其他方法相结合,如视觉特征或心率分析,以验证结论的可靠性。

3.2 评价内容

由于交通事故数据统计周期较长且获取困难,事故数据通常不作为视线诱导设施的主要评价指标。除了事故数据,公路隧道视线诱导设施的有效性可以从视觉感知、视觉特性、生理特性和驾驶行为这 4 个方面进行评价,进而构建综合评价体系。

1) 视觉感知。主要分析驾驶人对环境的感知能力,包括对前方车辆或障碍物的识别能力,以及速度错觉和曲率错觉等视错觉现象。在研究诱导设施的可视性时,通常通过测量距离来评估其效果。在隧道环境中,常见的视错觉包括速度错觉、距离错觉、曲率错觉和坡度错觉。这些错觉通常通过视错觉程度 (即感知与实际之间的差异百分比) 和反应时间进行衡量^[14]。

2) 视觉特性。主要包括注视行为、扫视模式、眨眼频次和瞳孔变化,衡量驾驶人获取信息的难度和效率^[22]。如 JIAO Fangtong 等^[9]通过兴趣区域浏览概率和平均浏览时间,评估了不同视线诱导设施的视觉引导效果。王首硕等^[23]研究发现,诱导信息可优化注视点分布,扩大视觉敏感区,从而提高视认效率。

3) 生理特性。用于量化驾驶人的紧张程度和疲劳状态,主要包括心电、脑电、肌电和皮电等数据。脑电信号可通过生理多导仪获取,并通过分析 α 波、 β 波和 θ 波的平均功率谱密度,判断驾驶人的疲劳、分心及情绪状态,其中, $(\theta+\alpha)/\beta$ 比值对疲劳程

度最敏感,可作为主要表征指标^[24]。心电主要分析心率和心率变异性,精神负荷增加时,心率上升而心率变异性降低^[25]。肌电可检测颈部或腰部肌肉疲劳,运动疲劳后表面肌电信号的平均功率频率会发生显著变化。皮电反映情绪变化,脑力负荷增加时皮肤电导水平升高^[26]。

4) 驾驶行为。主要包括驾驶人根据道路环境和汽车运动状态采取的各种操作,例如:操控离合器、油门、制动踏板及方向盘等,同时也涉及车辆的速度、加速度和横向偏移等运行状态指标。车辆的纵向控制指标,如速度、加速度和油门/制动效果^[8],常用于评估警告标志、视线诱导设施和减速标线等对减速效果的影响。横向控制指标如车道偏移、横向速度、横向加速度和方向盘转角,主要用于评估设施对车道保持的影响。

4 展 望

1) 现有研究在设施类型与功能分析方面已取得一定成果,为选择设计参数提供了初步理论基础。然而,隧道视线诱导设施的设置规范尚不完善,亟需进一步改进。未来应制定科学标准,针对不同隧道环境,明确设施类型、间距、颜色等关键参数。此外,还应关注设施间的协同作用,探讨其对视觉感知、驾驶行为和安全性的综合影响,以实现最优配置。最终,需建立科学有效的设置要求和评价体系,以推动技术推广和标准实施。

2) 现有研究在视觉感知、驾驶行为等方面积累了大量成果,初步揭示了视线诱导设施的作用特征,具有重要的启发意义。然而,现有设施评价主要集中于视觉感知、视觉特性和驾驶行为等层次,缺乏对它们相互关系的深入分析。未来应构建多层次的综合评价体系,涵盖视觉感知、驾驶行为、心理状态等,并考虑个体差异的影响。此外,分析各层面间的交互机制,有助于深入理解视线诱导设施对驾驶心理和行为的改善机制。

3) 尽管设施设计与实施阶段研究逐渐成熟,但

其在实际运行过程中的长期效果评估尚显不足。由于视线诱导设施的实际效果受隧道内照明环境和交通流量影响,需要建立有效的后评价机制,并根据实际情况进行动态调整。此外,应根据隧道风险水平排序,优先分配资源,并通过比较不同方案的经济效益和有效性,确定改善措施的优先级。

5 结 论

1) 目前,相关规范在设施尺寸、间距以及布置位置等方面的规定不够全面,并且未将路缘立面标记和弹性交通柱等设施纳入规范范畴。大多数研究集中于单一设施参数分析,针对多个设施组合的研究尚未充分开展,限制了隧道行驶安全性和舒适性的提升。

2) 公路隧道视线诱导设施主要作用在于明确空间路权、满足驾驶人需求,进而降低驾驶难度,提升驾驶舒适性,最终实现道路安全性的改善。设施设置需依据空间路权需求来确定应用类型和布局,结合曲率感知和速度感知需求,从视觉舒适性角度出发确定合适的间距。

3) 公路隧道视线诱导设施的分析数据获取方法包括交通事故统计、现场观测、室内仿真试验、实车试验和主观问卷等。实车试验和室内仿真试验是评估隧道视线诱导设施设计参数和改善效果的主要手段,结合现场观测和交通事故数据分析,可进一步验证设施的有效性。

4) 视线诱导设施的效果可通过视觉感知、视觉特性、生理特性和驾驶行为 4 个层面进行评价。视觉感知主要量化诱导设施对驾驶人感知准确性的影响;视觉特性反映其在缓解视觉疲劳和提升视觉引导效果方面的作用;生理特性评估驾驶人的疲劳与压力水平,揭示设施对驾驶人生理状态的调节效果;驾驶行为评估设施对驾驶行为的引导作用。通过从多个层面进行评价,可以全面揭示视线诱导设施在环境感知、行为改善和疲劳缓解方面的影响,为衡量设施效果提供多角度的依据。

参 考 文 献

[1] SUN Hao, WANG Qiuping, ZHANG Peng, et al. Spatialtemporal characteristics of tunnel traffic accidents in China from 2001 to present[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: DOI:10.1155/2019/4536414.

[2] PERVEZ A, LEE J, HUANG H. Exploring factors affecting the injury severity of freeway tunnel crashes: a random parameters approach with heterogeneity in means and variances[J]. Accident Analysis & Prevention, 2022, 178: DOI:

- 10.1016/j.aap.2022.106835.
- [3] 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.
- DU Zhigang, XU Wanwan, XIANG Yiming. Research on light environment improvement framework of highway tunnel based on visual guidance[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(4): 122-129.
- [4] LEE J, KIRYTOPOULOS K, PERVEZ A, et al. Understanding drivers' awareness, habits and intentions inside road tunnels for effective safety policies [J]. Accident Analysis & Prevention, 2022, 172: DOI:10.1016/j.aap.2022.106690.
- [5] ZHENG Zhanji, DU Zhigang, YAN Qixiang, et al. The impact of rhythm-based visual reference system in long highway tunnels[J]. Safety Science, 2017, 95: 75-82.
- [6] SHAHAR A, BRÉMOND R, VILLA C. Can light emitting diode-based road studs improve vehicle control in curves at night? a driving simulator study[J]. Lighting Research & Technology, 2018, 50(2): 266-281.
- [7] HAN Xueyan, SHAO Yang, YANG Shaowei, et al. Entropy-based effect evaluation of delineators in tunnels on drivers' gaze behavior[J]. Entropy, 2020, 22(1): DOI:10.3390/e22010113.
- [8] 樊兆董, 赵晓华, 李美玲, 等. 基于驾驶模拟技术的隧道反光环设置间距综合效果分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(34): 394-400.
- FAN Zhaodong, ZHAO Xiaohua, LI Meiling, et al. Comprehensive effect analysis of setting distance of tunnel retro-reflective arch based on driving simulation technology [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(34): 394-400.
- [9] JIAO Fangtong, DU Zhigang, WONG Y D, 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: DOI:10.1016/j.tust.2022.104937.
- [10] 林贵宝, 马荣国, 姚广鹏, 等. 平曲线路段突起路标设置[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2015, 35(6): 98-103.
- LIN Guibao, MA Rongguo, YAO Guangpeng, et al. Setting interval of raised pavement markers on the horizontal curve[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35(6): 98-103.
- [11] ZHAO Xiaohua, JU Yunjie, LI Haijian, et al. Safety of raised pavement markers in freeway tunnels based on driving behavior[J]. Accident Analysis & Prevention, 2020, 145: DOI:10.1016/j.aap.2020.105708.
- [12] ZWAHLEN H T, PARK J Y. Curve radius perception accuracy as function of number of delineation devices (chevrons)[J]. Transportation Research Record, 1995, 1495: 99-106.
- [13] ZHAO Xiaohua, WU Yiping, RONG Jian, et al. The effect of chevron alignment signs on driver performance on horizontal curves with different roadway geometries[J]. Accident Analysis & Prevention, 2015, 75: 226-235.
- [14] 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 Zhigang, NI Yudan, YANG Libo, 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.
- [15] 梅家林, 杜志刚, 贺世明, 等. 基于车距保持的公路隧道反光条设置及驾驶模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(1): 171-177.
- MEI Jialin, DU Zhigang, HE Shiming, et al. Study on reflective strip configuration and driving simulation in highway tunnels based on vehicle distance maintenance[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(1): 171-177.
- [16] 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.
- HUANG Ting, ZHANG Shijuan, JIANG Jingang, et al. Experimental study on visibility of facade marking on entrance portal of highway tunnel[J]. Highway, 2019, 64(12): 204-210.
- [17] WAN Hongliang, DU Zhigang, YAN Qixiang. The speed control effect of highway tunnel sidewall markings based on color and temporal frequency[J]. Journal of Advanced Transportation, 2016, 50(7): DOI:10.1002/atr.1405.
- [18] 潘兵宏, 周锡浜, 韩雪艳. 高速公路隧道入口连续视觉参照设施设置研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2021, 40(8): 132-139.
- PAN Binghong, ZHOU Xizhen, HAN Xueyan. Continuous visual reference facilities setting at tunnel entrance on

- expressway [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2021, 40(8): 132–139.
- [19] 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 Haoran, DU Zhigang, WANG Shoushuo, et al. Design of traffic safety optimization for expressway tunnel based on linear guidance[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(8): 134–141.
- [20] MA Jun, WU Yiping, RONG Jian, et al. A systematic review on the influence factors, measurement, and effect of driver workload[J]. Accident Analysis & Prevention, 2023, 192: DOI:10.1016/j.aap.2023.107289.
- [21] JIAO Fangtong, DU Zhigang, WONG Y D, et al. Influence of different visual guiding facilities in urban road tunnel on driver's spatial right-of-way perception [J]. Accident Analysis & Prevention, 2022, 172: DOI: 10.1016/j.aap.2022.106688.
- [22] 梁波, 秦灿, 牛佳安, 等. 基于 Topsis 改进因子分析的公路隧道入口段视觉负荷研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 77–84.
- LIANG Bo, QIN Can, NIU Jiaan, et al. Visual load in threshold zone of highway tunnel based on Topsis improved factor analysis method[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1): 77–84.
- [23] 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 Shoushuo, DU Zhigang, FENG Shouzhong, 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.
- [24] 裴玉龙, 金英群, 陈贺飞. 基于脑电信号分析的不同年龄驾驶人疲劳特性[J]. 中国公路学报, 2018, 31(4): 59–65, 77.
- PEI Yulong, JIN Yingqun, CHEN Hefei. Fatigue characteristics in drivers of different ages based on analysis of EEG[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(4): 59–65, 77.
- [25] 韩磊, 杜志刚, 杨永正, 等. 基于自然驾驶试验的公路螺旋隧道驾驶人心理旋转效应分析[J]. 中国公路学报, 2025, 38(3): 150–164.
- HAN Lei, DU Zhigang, YANG Yongzheng, et al. An analysis of mental rotation effect on drivers in highway spiral tunnel based on naturalistic driving experiment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(3): 150–164.
- [26] MEHLER B, REIMER B, COUGHLIN J F, et al. Impact of incremental increases in cognitive workload on physiological arousal and performance in young adult drivers[J]. Transportation Research Record, 2009, 2138(1): 6–12.

作者简介: 梅家林 (1998—),男,湖北黄冈人,博士研究生,研究方向为隧道交通安全和道路交通规划。
E-mail:1473506436@qq.com。