

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

杜志刚^{1,2}, 韩磊^{1,2}, 梅家林^{1,2}, 贺世明^{1,2}, 杨永正^{1,2}

(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)

摘要: 小半径公路长隧道内部为典型弱视觉参照环境, 极易诱发驾驶人心理旋转效应, 难以准确辨识隧道线形、隧道轮廓和交通信息, 驾驶绩效降低, 行车风险增大。为缓解驾驶人心理旋转效应, 提升小半径公路长隧道交通安全水平, 从其视觉环境典型行车安全问题出发, 提出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。结果表明: 小半径公路长隧道视觉参照系具有诱导信息过渡剧烈、违背驾驶期望和冗余性欠缺等特点, 突出表现为视线诱导信息不连续、局部视觉参照信息与整体视觉环境信息不一致、轮廓诱导信息与线形诱导信息协同作用差等方面。根据空间路权、驾驶人因和驾驶任务等评价要素, 结合视知觉恒常性、整体优先性、多层次诱导等理论, 提出构建恒常稳定、连续一致、信息冗余的视觉参照系的优化思路。总结提出通过布设多频率、多尺度、多形状的视线诱导设施, 利用局部视觉参照元素构建与整体行车环境信息相连续一致的参照线索, 加强轮廓诱导与线形诱导, 借助高位、中位与低位诱导信息的协同作用构建信息冗余的多层次视觉参照系, 有效缓解心理旋转效应带来的负面影响, 达到行车安全、舒适、低成本、可持续的优化目标。该研究可为小半径公路长隧道、小半径光学长隧道的交通安全提升提供理论依据。

关键词: 小半径公路长隧道; 心理旋转效应; 恒常性; 整体优先性; 多层次诱导

中图分类号: U491

文献标志码: A

Optimization Research Framework of Visual Environment for Small Radius Highway Long Tunnel Based on Mental Rotation Effect

DU Zhigang^{1,2}, HAN Lei^{1,2}, MEI Jialin^{1,2}, HE Shiming^{1,2}, YANG Yongzheng^{1,2}

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

Ministry of Education, Wuhan 430063, China)

Abstract: The inside of a small-radius highway long tunnel is a typical weak visual reference environment, which easily induces the mental rotation effect of drivers. As a result, it becomes difficult to accurately identify the alignment, the contour of the tunnel, and the traffic information, leading to a decrease in driving performance and an increase in driving risks. To alleviate the mental rotation effect of drivers and improve the traffic safety of small-radius highway long tunnels, this paper proposes a visual environment optimization research framework for small-radius highway long tunnels based on the mental rotation effect, starting from typical driving safety issues in its visual environment. The results show that the visual reference system of small-radius highway long tunnels has characteristics such as inducing a significant transition of information, violating driving expectations, and lacking redundancy, which are prominently manifested in aspects such as discontinuous visual guiding information, inconsistent local visual reference information with the overall visual environment information, and poor collaboration between contour and alignment guiding information. Based on evaluation factors such as spatial right-of-way, driving human factors, and driving tasks, and in combination with theories such as visual perceptual constancy, global-precedence, and multi-level guiding, this paper proposes an optimization idea of constructing a constant, stable, continuous, and redundant visual reference system. In summary, this paper proposes to deploy multi-frequency, multi-scale, and multi-shape visual guiding facilities, and use local visual reference elements to construct a continuous and consistent reference clue with the overall driving environment information, enhance contour and alignment guiding, and construct a multi-level visual

收稿日期: 2023-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(52072291)

第一作者: 杜志刚(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为道路交通安全与交通规划。

E-mail: zhig_du7@163.com

通信作者: 韩磊(1993—), 男, 博士生, 主要研究方向为道路交通安全与驾驶人因。E-mail: hanleibest@163.com



论文
拓展
介绍

reference system with redundant information by leveraging the collaborative effect of high, middle, and low-level guiding information to effectively alleviate the negative impact of mental rotation effect and achieve the optimization goals of driving safety, comfort, low cost, and sustainability. This paper can provide a theoretical basis for enhancing traffic safety in small-radius highway long tunnels and small-radius optical long tunnels.

Key words: small radius highway long tunnel; mental rotation effect; constancy; global-precedence; multi-level guiding

随着社会经济建设的蓬勃发展和工程技术水平的不断提高,我国公路隧道建设规模和数量也迅猛发展。根据中华人民共和国交通运输部《2022年交通运输行

业发展统计公报》显示,截至2022年末,全国公路总里程535.48万公里,比上年末增加7.41万公里,全国公路隧道24 850处、2 678.43万延米,较上年增加1 582处、208.54万延米^[1],我国已成为世界上公路隧道规模最大、数量最多、发展速度最快的国家。在公路隧道建设时,直线公路隧道有时难以满足路线控制点之间的高差以及地质条件复杂地带的线形控制,而面对高差大和地质条件复杂的特点,修建小半径公路长隧道能够很好地满足山区公路的需求,其中当小于设计速度对应的圆曲线最小半径极限值的4倍时即被视为小半径曲线^[2]。近年来,我国小半径公路长隧道的建设和应用发展迅速,典型小半径公路长隧道工程有雅西高速干海子和铁寨子双螺旋隧道、延崇高速金家庄隧道,以及世界最长螺旋隧道——新晋高速韩口隧道等,如图1所示。

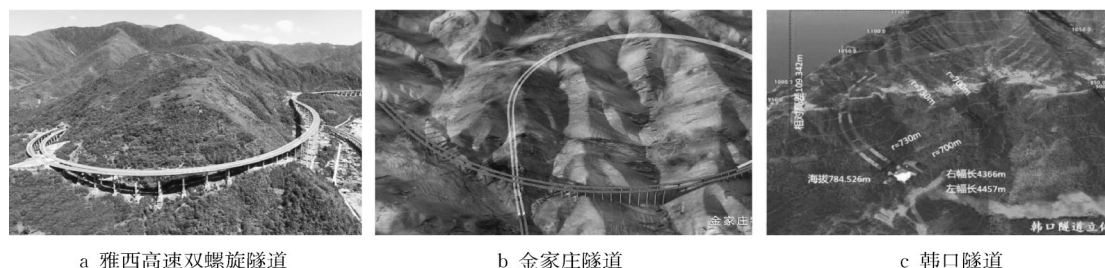


图1 典型小半径公路长隧道

Fig. 1 Typical small radius highway long tunnels

道路交通系统是一个由人、车、路、环境等多因素构成的复杂系统,各因素间信息的传递、处理、控制与反馈机制,决定了交通系统中的每个环节都有可能对交通安全产生不利影响。根据系统论的观点,交通事故的发生是“人-车-路-环境”道路交通系统中多因素相互作用显著导致该动态系统失衡的结果,而针对公路隧道的交通安全问题,国内外诸多专家学者也从“人-车-路-环境”系统的各因素方面做了大量卓有成效的研究工作,大多集中于事故统计^[3]、事故预测^[4]、照明环境^[5]、交安设施^[6]等方面。但是目前对于小半径公路长隧道交通安全改善的相关研究相对较少。张天乐^[7]以干海子螺旋隧道为例,研究了小半径曲线隧道的线形与照明对交通行车安全的影响;周海宇^[8]分析了小半径曲线隧道的交通特性、事故特性并提出了相关的安全保障技术;Bassan^[9]从视距和弯道工程设计指标等方面对比分析了高速公路隧道与开阔的高速公路在弯道路段做安全设计时应有不同侧重点;杜志刚等^[10]分析了高速公路隧道不同半径弯道路段的轮廓带设置数量对驾驶人曲率感知能力的影响规律;杨理波等^[11]分析高速公路隧道小半径圆曲线路段轮廓带线形诱导的有

效性,发现设置3个轮廓带能够使驾驶人迅速对隧道小半径弯道路段的线形作出更准确的判断;牟星宇等^[12]通过仿真实验分析了高速公路隧道弯道路段不同半径条件下线形诱导标和轮廓带设置情况对驾驶人弯道错觉感知的影响。可见,目前对于小半径公路长隧道的驾驶风险与交通安全改善研究还处于起步阶段,亟需相关理论与技术手段的支撑。

驾驶人行车获取的道路行车环境信息中依靠视觉获取的比例高达90%以上^[13],因此,合理适宜的视觉信息是驾驶人安全和高效行车的重要保障。特别是在小半径公路长隧道内,受光环境、道路线形、车辆受力和视距受限的影响,驾驶任务难度显著提高,驾驶人的驾驶工作负荷明显增大。因此,小半径公路长隧道内部环境应该为驾驶人提供高质量的、有效的、合理的视觉诱导信息,帮助驾驶人提前预知和判断隧道建筑轮廓和线形走向,减轻驾驶负荷,诱导驾驶人安全舒适的驶离。通过视线诱导设施优化公路隧道内视觉环境以求提升交通安全水平已然成为行业认可的有效手段^[14],但是针对小半径公路长隧道视觉环境的改善策略和理论模型还不成熟。利用视觉参照系优化的理论与技术

手段对小半径公路长隧道视觉环境进行改善,旨在通过低成本、长期有效、主动防控的手段,为驾驶人提供恒常稳定、连续一致的视觉参照信息,符合驾驶人期望,降低驾驶工作负荷,从而安全舒适有效诱导驾驶人驶离隧道。

针对上述背景,本文从小半径公路长隧道的视觉环境问题现状出发,结合认知心理学、交通行为学等理论提出基于心理旋转效应的小半径公路长隧道视觉环境优化理论和方法,并从驾驶人因与驾驶任务等层面提出面向心理旋转效应改善的小半径公路长隧道视觉参照系评价体系与研究框架。本文可为小半径公路长隧道和小半径光学长隧道的交通安全提升提供理论指导和工程借鉴参考。

1 小半径公路长隧道视觉环境典型问题

良好的视觉环境是驾驶人安全行车的重要保障^[14]。小半径公路长隧道行车时驾驶人为安全高效地完成驾驶任务,需要感知获取必要的视觉线索和信息,而视觉参照系就是驾驶人与小半径公路长隧道视觉环境信息交互的关键。视觉参照系是指能够为观察者提供视觉线索相关信息的总和,包括形状、尺寸、颜色、亮度、位置等信息^[15]。驾驶人行车过程中为完成驾驶任务需要不断搜索和获取与行车相关的道路行车环境信息,以确认自身车辆位置、方向和速度等运行状态,这些道路行车环境信息则构成了道路交通视觉参照系,包括交通标志、标线、景观和照明等信息。根据行车环境以及驾驶人需求的不同可以构建不同类型的道路交通视觉参照系,如安全型视觉参照系、舒适型视觉参照系等^[16]。

小半径公路长隧道内部典型弱视觉参照系环境特征在于:一方面,小半径公路长隧道内部照度低、对比度低,视觉环境相对单调,该环境特征易导致驾驶人对位置、方向、速度和距离等信息的感知与判断失准,产生一定程度的视错觉和紧张心理,小半径公路特长隧道环境还易导致视觉疲劳或视觉分心的现象,从而诱发一系列危险驾驶行为;另一方面,小半径公路长隧道视距与视区受到严重限制,再受到曲率与横向力的作用影响,驾驶人对信息的搜索获取与行车稳定性受到影响,这也造成一定程度的驾驶风险。因此,小半径公路长隧道内部视觉参照系的优劣对交通安全与通行效率至关重要,但是目前小半径公路长隧道内部视觉环境仍存在诸多问题,概括其特点为恒常性不足、部分与整体不一致和诱导信息层次不足。

1.1 诱导信息剧烈过度——恒常性不足

小半径公路长隧道内部视觉参照系恒常性的体现是要求隧道行车环境应为驾驶人提供连续、一致的视线诱导信息来诱导其完成系列驾驶任务,使得驾驶人在小半径公路长隧道内部行车时的短距离、中距离和长距离处均可对隧道内相关视线诱导信息具有良好的可视性。通过视线诱导设施的合理布设,使得小半径公路长隧道内部视觉参照系具备恒常性的特点,旨在为驾驶人营造连续稳定的、清晰可视的视觉参照和行车环境,使得驾驶人在小半径公路长隧道行车时在远、中、近段的各位置均能够依靠视线诱导信息确认自身方位,容易感知隧道线形走向和变化,明晰建筑限界与障碍物轮廓。

不同形状视线诱导设施的可视性具有显著差异。球形、圆柱形、半圆柱形、V形和薄片形的设施的可视性逐渐降低。而当前小半径公路长隧道内部视线诱导设施类型多为片状逆反射型,如图2a所示,该类型视线诱导设施只能在较小观察角内可视,超出此范围,设施的逆反射亮度和可视性迅速降低,驾驶人行车过程中对设施的视认有暗—亮—暗的变化感,从而造成诱导信息的不连续和剧烈过度。但在小半径公路长隧道内,需要视线诱导设施在较大范围和长距离尺度上保证逆反射亮度稳定性和较高的可视性。采用V形或拱形诱导设施可使车辆行进过程中诱导设施的亮度不会剧烈变化,有利于提升驾驶人对行车环境信息的准确认知。

1.2 违背驾驶期望——部分与整体不一致

小半径公路长隧道内部视觉参照系整体优先性的体现是要求隧道行车环境信息的部分与整体相一致以及由部分信息能够推断整体信息,即视觉环境信息与小半径公路长隧道整体行车环境信息相一致,并且驾驶人能够通过部分视线诱导信息感知判断出整体行车环境信息。要求小半径公路长隧道内视线诱导设施与隧道断面一致,可视范围大,长距离可视不间断,便于驾驶人准确判断隧道建筑限界和当前车道信息。通过视线诱导设施的合理布设,使得小半径公路长隧道内部视觉参照系具备整体优先性的特点,旨在为驾驶人营造操作简易的、自解释的视觉参照和行车环境,符合驾驶人行车时的驾驶期望,有效降低驾驶人感知反应时间,对行车环境变化能迅速感知与判断,进而减轻认知与驾驶工作负荷。

如图2b所示的场景就是整体优先性薄弱的典型场景,视线诱导信息均为点状信息,驾驶人难以通过目前现有的视线诱导信息对小半径公路长隧道的



图2 小半径公路长隧道视觉环境典型问题

Fig. 2 Typical problem of visual environment of small-radius highway long tunnel

整体信息进行把控推断,多点诱导的形式对隧道轮廓与建筑限界勾勒不足,导致空间路权不明晰,隧道线形变化的判断难度较大,此外高频点状信息量大,也会额外增加视觉负荷。

1.3 冗余性欠缺——诱导信息层次不足

小半径公路长隧道内部视觉参照系诱导信息冗余性的体现是要求隧道行车环境应为驾驶人提供多层次的视线诱导和参照信息,主要包括轮廓诱导信息与线形诱导信息。多层次是指小半径公路长隧道低位、中位与高位信息的组合,使得视觉参照系成为清晰显著的三维立体参照系;冗余性是指低位、中位与高位的视线诱导信息协同作用,使得轮廓诱导性能与线形诱导性能互相补强,即便部分信息遮挡、缺失或失效的条件下,仍然能够保证整个视线诱导系

统功能的正常运作。

如图2c所示的场景就是整体优先性薄弱的典型场景,线形诱导标与轮廓标的组合设置虽然在一定程度上提高了驾驶人对隧道线形与侧壁轮廓的感知与判断,但是对于车道分界与隧道洞顶轮廓等低位与高位信息表征缺失,信息冗余不足;另外,倘若交通流较大或大型车辆较多时,当前视线诱导信息容易遮挡,致使驾驶人可参照的最有意义信息(most meaningful information)骤减失效,视线诱导系统信息容错性降低,从而导致驾驶人的驾驶风险增加。

综合上述分析,对目前小半径公路长隧道内部视觉参照系的典型问题及其具体表现,由此带来的驾驶风险和相应的调控思路如表1所示。

表1 小半径公路长隧道视觉参照系典型问题剖析

Tab. 1 Analysis of typical problems of visual reference system in small radius highway long tunnel

典型问题类型	具体表现	风险特征	调控思路
恒常性不足	诱导信息过渡剧烈、不连续,难以辨识弯道诱导设施,建筑限界体现不明显。	驾驶人缺少可参照的恒常稳定的视线诱导信息,导致驾驶人对自身车辆与周边车辆和道路环境产生系列错误估计,空间感知系统失真,诱发驾驶风险。	通过明显的色差或亮度对比度明晰建筑限界与障碍物轮廓,使得视线诱导信息连续一致,构造稳定恒常的视觉环境,保障驾驶人在弯道路段各位置均能有效正确感知线形变化和诱导。
部分与整体不一致	局部视觉参照系信息与整体视觉环境信息不一致,难以通过部分信息有效推断感知整体行车环境。	驾驶人感知反应时间增长,不符合驾驶人心理预期,空间路权的体现不明晰,道路线形的变化感知较弱。	通过改善局部视觉参照系信息与整体环境信息相一致,减少驾驶人感知反应时间;视觉诱导信息应能确保驾驶人有效感知判断前方道路条件与环境的变化,使驾驶环境更为友善和简单。
诱导信息层次不足	轮廓诱导信息与线形诱导信息协同作用性差,视觉诱导信息多维与多层次体现薄弱,导致轮廓诱导和线形诱导的容错性较低。	多维诱导信息表征缺失,导致驾驶人对轮廓和线形信息感知能力降低,受交通流影响下视认效果更差。	低位、中位与高位的视线诱导信息协同作用,使得轮廓诱导性能与线形诱导性能互相补强,通过诱导信息的冗余性提升视觉环境的诱导功能容错性。

2 心理旋转效应及改善原理

2.1 心理旋转效应

在认知心理学中,心理旋转(mental rotation)是一种想象自己或客体旋转的空间表征转换能力,它

是表象转换加工的一个重要组成部分。作为人类空间能力的一个基本方面及空间认知的一种基本操作,心理旋转是人类形象思维加工的一种重要手段,是评价个人空间信息认知和加工能力的重要指标之一^[17]。任何一种空间表征都需要依照参照系来定义

客体内部或者客体之间的关系,也需要运动各种参照系对这些表征进行不同的心理转换。空间参照系可以分为自我中心参照系和客体中心参照系(环境中心参照系),当参照系之间不一致时,常常需要进行参照系转换,而参照系转换需要耗费认知心理资源,导致认知负荷的增加,也增加了出错的可能性。

心理旋转与很多领域的操作能力有较高的相关性,诸如数学、机械和交通等领域,相关研究发现,在某些交通场景中驾驶人会产生心理旋转效应,由于参照系的不一致,导致驾驶人需要不断的转换和对比大脑与现实中的方位,以便更好地获取行车环境信息,从而完成驾驶任务。此时心理旋转效应就成为一种由行车环境视觉参照系变化给驾驶人带来的负面影响,而这种心理旋转效应能够产生较高的驾驶负荷,损害驾驶绩效,从而造成驾驶风险^[18]。驾驶人通过自身心理旋转能力抵抗这种消极效应时,由于分配较多的心理和注意资源会导致驾驶任务难度增大和驾驶绩效受损,因此,行车环境视觉参照系应最大程度减弱或抵消心理旋转效应,进而保证驾驶人有足够的精力和注意资源用于完成驾驶任务。

研究发现,心理旋转具有相对易变性和可塑性的认知加工特征,这就为改善驾驶人心理旋转效应提供了可能。同时,考虑驾驶人行车过程中需要依照视觉参照系完成感知、决策和执行等系列驾驶任务,因此,在行车环境中驾驶人产生的心理旋转效应可以通过优化视觉参照系进行缓解^[19]。通过合理布设相关交通工程设施特别是视线诱导设施来优化视觉参照系、改善视线诱导系统设计的手段在公路隧道已经得到了应用和验证^[20],取得了较好的效果反馈。小半径公路长隧道内部驾驶人心理旋转效应概念模型如图 3 所示。

2.2 改善原理

针对小半径公路长隧道内驾驶人易产生心理旋转效应的特点,小半径公路长隧道内的视觉参照系优化则需要重点考虑驾驶人因层面,确保驾驶人获取良好的视觉参照,改善驾驶人对道路行车环境信息的视认和感知能力,提升驾驶绩效,达到安全舒适通行的目的。保障驾驶人在小半径公路长隧道内行车时,在短距离范围内每个断面的视线诱导与行车环境保证恒常性,在中长距离范围内部分信息与整体信息一致、诱导信息连续,在整体范围内多层次视线诱导信息冗余、保障线形诱导与轮廓诱导。

本文结合认知心理学、交通行为学等理论和相关研究基础,考虑驾驶人心理旋转效应的小半径公路长隧道视觉参照系优化原理包括视知觉恒常性、整体优

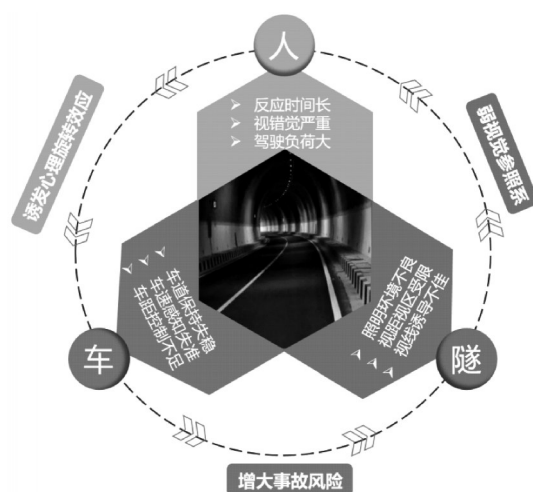


图3 小半径公路长隧道内部驾驶人心理旋转效应概念模型

Fig. 3 Conceptual model of driver's mental rotation effect in small radius highway long tunnels

先性和多层次诱导。小半径公路长隧道视觉参照系优化原理的具体释义和相应要求如表 2 所示。

2.2.1 视知觉恒常性

视知觉是指眼球将从外界接收到的视觉信息传导至大脑并进行辨识与整合的过程,也是驾驶人解释并利用视觉信息来决策和行动的能力。视知觉恒常性是指当视知觉的条件产生了一定程度的改变时,驾驶人对于视觉对象的映像依然保持不变,并能识别出具有一定视觉差异的同一对象。驾驶人视知觉的恒常性是其在与行车环境相互作用中建立起来的,一旦驾驶人与行车环境的正常关系遭到破坏,视知觉恒常性也会遭到不同程度的破坏。视知觉的恒常性体现在视认对象的形状和颜色等各方面。但是个体视知觉恒常性的维持程度是有极限的,特别是驾驶人在小半径公路长隧道弱视觉参照系条件下行车时,视知觉恒常性极易受到损害,继而诱发空间感知里的系统失真,即对方向、曲率等信息感知的视错觉,造成驾驶风险。因此,小半径公路长隧道视觉参照系优化应考虑维持驾驶人视知觉恒常性,保障驾驶人在短距离范围内每个断面的诱导设施与行车环境恒常一致,调控驾驶人视错觉,优化视距视区,减少反应时间。

2.2.2 整体优先性

驾驶人获取的视觉信息大多为复合刺激信息,即由若干相对独立的局部信息组成的整体信息。视觉信息有着其本身的整体性质,同时组成整体的个体也有其独立的局部性质,而人眼视觉系统对视觉信息整体性质和局部性质的加工顺序是心理学和认知科学中的热点研究问题。格式塔心理学家们认为整体的性质在

表 2 优化原理的具体释义与要求

Tab. 2 Specific interpretation and requirements of optimization principle

优化原理	具体释义	要求
视知觉恒常性	形状恒常性 指人在观察物体的角度发生变化而导致视网膜上的映像发生改变时,其原本的形状知觉保持不变的知觉特征。	通过视线诱导设施的恒常性构造小半径公路长隧道行车环境的恒常性,利用连续一致的诱导信息、对比度显著的色彩差异,构造稳定恒常的视觉参照系。将视错觉调控在合理范围内,保障驾驶人容易获取信息,营造符合驾驶期望的行车环境,提升驾驶绩效,保证行车安全。
	颜色恒常性 当观察物体的颜色因光照条件改变而改变时,人对熟悉物体的颜色知觉仍趋于一致的知觉特性。	
整体优先性	部分与整体一致 视线诱导设施信息(部分信息)与小半径公路长隧道行车环境信息(整体信息)相一致。 由部分推断整体 利用视线诱导设施强化部分信息,便于驾驶人由此感知和推断小半径公路长隧道行车环境的整体信息。	通过合理布设视线诱导设施重构视觉参照系,强化部分信息认知功能,提升小半径公路长隧道整体信息感知和判断能力,完善部分与整体信息的交互,符合驾驶期望,减少感知反应时间,进而保障行车安全。
多层次诱导	线形诱导 引导或警示隧道平面线形的变化,使驾驶人获得良好的方向感,及时根据线形变化合理适当调整行车方向。	通过加强多层次视线诱导信息的协同作用,使得线形诱导与轮廓诱导互相补强,使驾驶人有效明确空间路权,降低视错觉,提高容错率,提升驾驶绩效,有利于驾驶人安全舒适通过小半径公路长隧道。
	轮廓诱导 警示隧道整体及障碍物轮廓,明晰空间路权,使驾驶人获得良好的空间感,可及时调整车辆的横向位置。	
	信息冗余 依靠线形诱导与轮廓诱导的多维多层次信息,保障驾驶人对行车环境的视认与感知,有效提升容错能力,降低驾驶负荷。	

知觉中起主导作用,即整体优先性,大量实验研究证实了人类在视知觉任务中存在着明显的整体优先效应^[21],并且在心理旋转过程中同样也存在整体优先效应。知觉的整体性强调两方面:①当部分信息与整体信息一致时,识别视认更为容易和快捷;②可通过部分信息推断出整体信息,并且即便弱信息改变,只要强信息不变,依然能够对其认知成功^[22]。另外,影响知觉整体性的重要因素就是刺激物的结构,即刺激物的空间分布和时间分布。因此,根据视知觉整体优先效应,应将小半径公路长隧道弱视觉参照系转换为强视觉参照系,通过合理的视线诱导技术优化信息视认效果,保持部分与整体的一致性,强化部分信息认知功能(线型轮廓标、侧壁线形诱导标等),提升驾驶人对小半径公路长隧道行车环境整体信息的视认和感知,保证行车安全性。

2.2.3 多层次诱导

轮廓知觉是视觉识别的重要方面,轮廓决定了人们的知觉,是人们对物体或环境的边界界定、形状感知和变化确认的基础。格式塔心理学中关于良好图形的知觉组织理论认为,当视野中出现不完整性因素时,视觉系统就倾向于将其完整起来,变成比较简单、稳定、正规化的图形^[23]。研究表明:在隧道内的行车方向和隧道空间轮廓(包括线形的变化以及隧道建筑和障碍物的轮廓)的明晰程度对驾驶人行车安全带来很大影响,尤其是在小半径公路长隧道内,不良的弱视觉参照系会对驾驶人的道路线形变化视认感知以及隧道侧壁等障碍物的轮廓空间辨识程度产生负面影响^[24]。因此,根据视知觉心理学和驾驶人因工效学相关理论和研究成果,小半径公路长隧道视觉参照系优化应考虑刺激

物的时空分布,利用视线诱导设施构造多层次、连续的、一致的线形诱导和轮廓诱导,增强信息冗余(高位轮廓带、中位线形诱导标和腰带线、低位突起路标与线型轮廓标等协调设置),强化驾驶人空间路权感知能力,减少视错觉,提升驾驶绩效。小半径公路长隧道视觉参照系优化原理的方法与目标效果如图 4 所示。

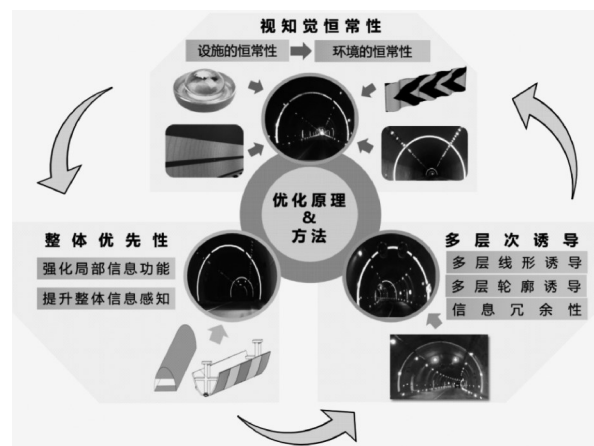


图 4 优化原理的方法与目标效果

Fig. 4 Method and objective effect of optimization principle

3 基于心理旋转效应的小半径公路长隧道视觉参照系优化及评价

3.1 优化设计架构

通过对小半径公路长隧道视觉环境特征的分析,剖析目前小半径公路长隧道视觉参照系典型问题,结

合该行车环境中驾驶人的驾驶任务需求,依据认知心理学和交通行为学等相关理论知识,提出基于心理旋转效应改善的小半径公路长隧道视觉参照系优化研究思路。通过利用视线诱导设施合理协同设置的视觉参

照系优化技术,有效缓解小半径公路长隧道驾驶人的心理旋转效应,提升驾驶绩效,保证小半径公路长隧道通行安全与效率。基于心理旋转效应的小半径公路长隧道视觉参照系优化设计架构如图5所示。

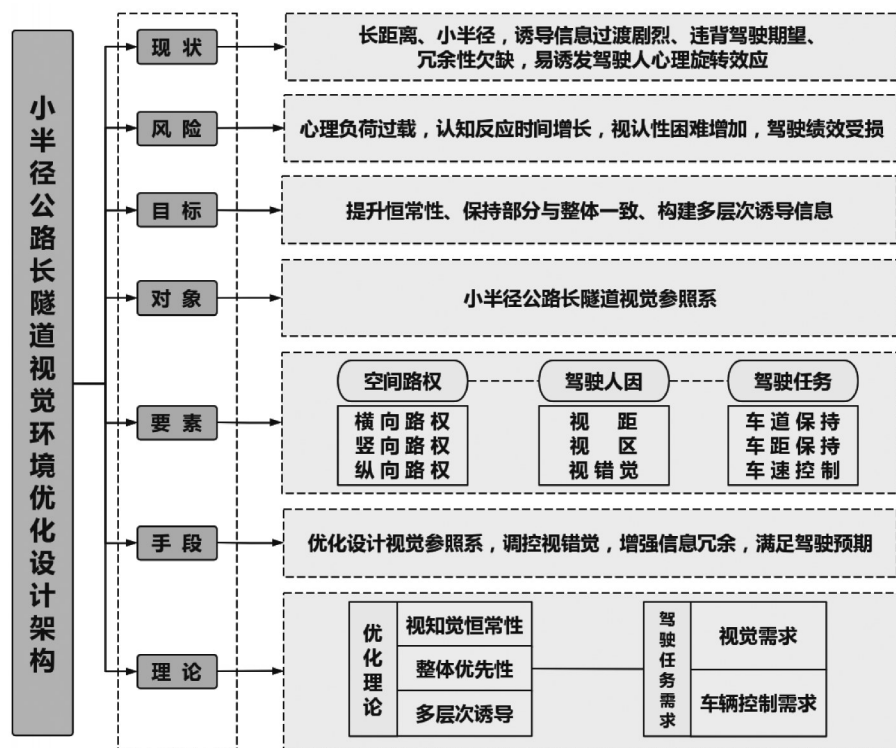


Fig. 5 Optimal design framework of visual reference system for small radius highway long tunnel

3.2 优化研究框架

小半径公路长隧道典型弱视觉参照系,容易诱发驾驶人心理旋转效应,从而损害驾驶绩效,危害行车安全。从驾驶人视觉需求和车辆控制需求的角度出发,以提升小半径公路长隧道视觉环境质量、减轻驾驶负荷,规避驾驶风险为目标,提出小半径公路长隧道视觉参照系优化思路:依据视知觉恒常性、整体优先性和多层次诱导等原理,构建恒常稳定、连续一致、简单明确、信息冗余的视觉参照系。进而提出小半径公路长隧道视觉参照系优化方法:通过布设多频率、多尺度、多形状的视线诱导设施,利用局部视觉参照元素构建与整体行车环境信息相一致的参照线索,对小半径公路长隧道的轮廓与线形进行凸显与警示并充分体现其连续性与一致性,借助高位、中位与低位诱导信息的协同作用构建信息冗余的多层次视觉参照系,进而满足不同视觉条件与车辆类型的驾驶需求,有效缓解心理旋转效应带来的负面影响,达到保障驾驶人在小半径公路长隧道行车安全的优化目标。由此提出基于心理旋转效应的小半径公路长隧道视觉参照系优化设计思路框

架,如图6所示。小半径公路长隧道视觉参照系优化研究框架主要包括以下几部分:

(1) 小半径公路长隧道行车环境与交通安全分析

小半径公路长隧道行车环境与交通安全之间的关系是后续深入研究小半径公路长隧道视觉参照系与心理旋转效应以及驾驶风险的关键基础。首先,总结分析小半径公路长隧道的交通事故形态、原因、时空分布特征,以及该路段工程条件、光环境和视线诱导设施布设情况,初步确定视觉环境与交通安全的关联性。其次,通过多处不同视觉参照系条件的小半径公路长隧道的实车驾驶试验,采集驾驶人行车时的视觉特性数据、驾驶行为数据等,从视知觉和驾驶行为的角度,利用主成分分析、相关性分析等方法,分析不同视觉参照系条件与驾驶行为之间的关联性,并依据关联性分析结果,确定小半径公路长隧道视觉参照系的调控优化方向。

(2) 小半径公路长隧道驾驶人心理旋转效应下驾驶绩效分析

探究小半径公路长隧道不同视觉参照系下心理

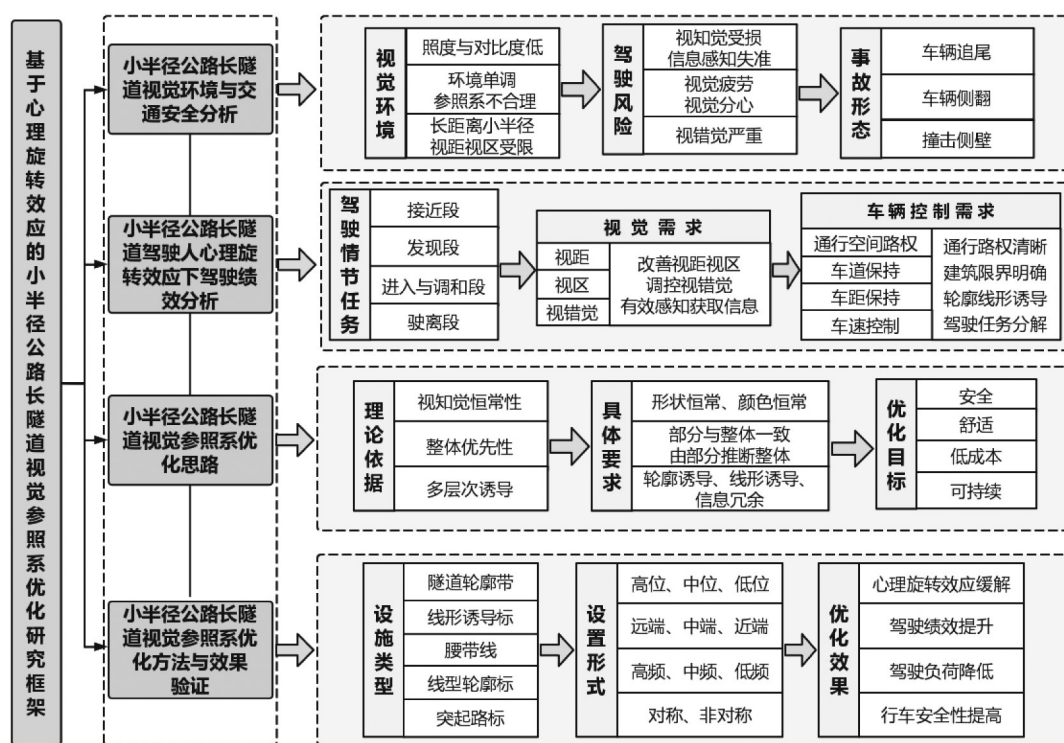


图6 基于心理旋转效应的小半径公路长隧道视觉参照系优化研究框架

Fig. 6 Research framework of visual reference system optimization of small radius highway long tunnels based on mental rotation effect

旋转效应与驾驶绩效之间相互表征的充分必要性,以及在心理旋转效应作用下驾驶绩效的表现规律是拟解决的重要问题。依据不同视觉参照系条件的小半径公路长隧道的实车驾驶试验采集到的驾驶人视觉特性和驾驶绩效指标数据,利用析因分析、假设检验等方法,确定由视觉参照系因素造成的心理旋转效应变化,如视觉参照系类型如何影响驾驶人注意力分配、信息获取难易度、判别反应时、车辆行驶速度变化以及车道稳定维持能力等,结合驾驶人在试验前后的主观询问评价和心理量表打分等手段,确定驾驶人心理旋转效应产生的条件与状态,并采用主成分分析法筛选出能够有效表征驾驶人心理旋转效应和驾驶绩效受损突变的特征向量,并通过 Logistic 回归、结构方程模型等方法,对不同视觉参照系影响下的心理旋转效应和驾驶绩效进行建模与评估。

(3) 小半径公路长隧道视觉参照系优化思路

针对小半径公路长隧道弱视觉参照系使驾驶人易产生心理旋转效应的特点,小半径公路长隧道的视觉参照系重构则需要重点考虑驾驶人因层面,从视觉需求和车辆控制需求出发,确保驾驶人获取良好的视觉参照,增强小半径公路长隧道内部的线形

诱导与轮廓诱导能力,保证视觉参照信息与环境恒常性、整体性与冗余性,提升驾驶人对道路行车环境信息的视认和感知能力,达到安全、舒适、低成本、可持续的优化目标。

(4) 小半径公路长隧道视觉参照系优化方法与效果验证

依据提出的小半径公路长隧道视觉参照系重构思路,确定不同条件下小半径公路长隧道的差异化视觉参照系优化方案,并对其有效性进行验证是本研究的关键内容。通过仿真技术软件和平台搭建小半径公路长隧道模拟场景,并进行模拟驾驶试验,分析不同半径、不同区段、不同视觉参照系的小半径公路长隧道驾驶人的视觉特性和驾驶绩效指标变化规律,分析曲线半径、区段位置以及视线诱导设施的协同组合、对称形式、频率呈现、色彩选择等单因素和多因素耦合作用下公路隧道弯道驾驶人心理旋转效应与驾驶绩效作用规律,并通过层次分析法(AHP)模糊综合评价、贝叶斯神经网络模型与熵权可拓物元模型等方法对改善方案进行解释与验证。

3.3 优化案例分析

根据 3.1 和 3.2 节提出的基于心理旋转效应的小半径公路长隧道典型弱视觉参照系优化思路与设

计方法,对小半径公路长隧道视觉参照系优化前后的案例进行分析,优化前后的场景如图 7 所示。

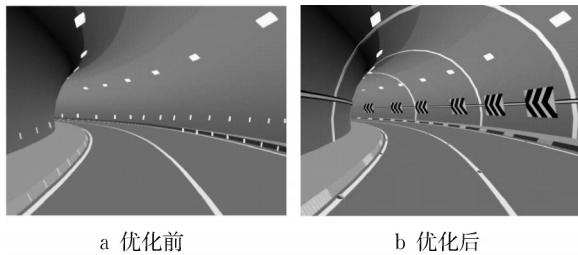
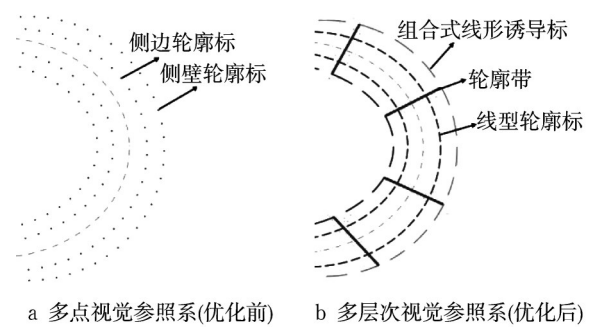


图 7 小半径公路长隧道视觉参照系优化方案前后对比示意
Fig. 7 Comparison of visual reference system of small radius highway long tunnel before and after optimization

小半径公路长隧道视觉参照系优化方案如下:路面标线处高频设置反光突起路标;检修道路缘设置矩形线型轮廓标,形式为左黄右白;隧道内外侧壁设置连续包边型腰带线,并在外侧中频设置线形诱导;隧道侧壁与拱顶低频设置隧道轮廓带。小半径公路长隧道视觉参照系与典型设施的优化前后对比示意如图 8 和图 9 所示。



a 多点视觉参照系(优化前) b 多层次视觉参照系(优化后)

图 8 小半径公路长隧道视觉参照系优化前后对比示意
Fig. 8 Comparison of visual reference system for small radius highway long tunnels before and after optimization

由图 8 可知小半径公路长隧道视觉参照系优化前为多点视觉参照系,该类型视觉参照系对于小半径公路长隧道的线形和轮廓诱导能力不足,空间路权指示不明晰,易诱发驾驶人的视认和感知错觉;而优化后为多层次视觉参照系,该类型视觉参照系可以有效的勾勒小半径公路长隧道的线形和轮廓,空间路权明确,多层次的视线诱导信息保证了冗余性,可有效调控视错觉,降低驾驶负荷。

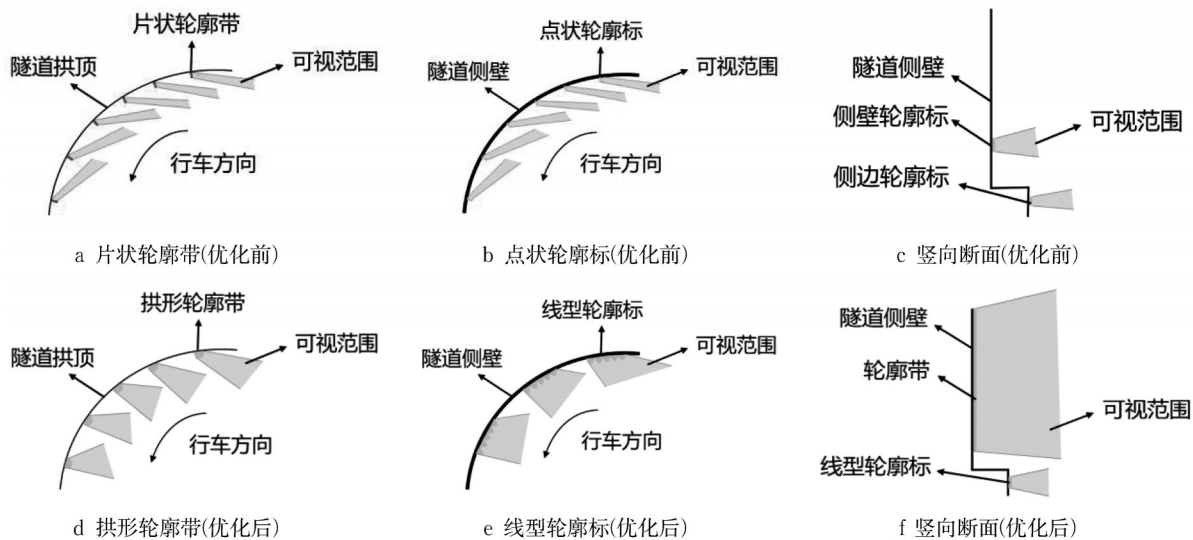


图 9 小半径公路长隧道视觉参照系典型设施优化前后对比示意

Fig. 9 Comparison of typical facilities of visual reference system for small radius highway long tunnels before and after optimization

图 9 的 a-d(对照关系,下同)和 b-e 展示了小半径公路长隧道视觉参照系中轮廓带和轮廓标两种典型诱导设施优化前后的对比示意,可以明显看出优化前的片状轮廓带与点状轮廓标对驾驶人的可见范围较小,行车诱导效果较弱;而优化后的拱形轮廓带和线型轮廓标则使得驾驶人的可见范围更广,更有利于驾驶人对小半径公路长隧道行车环境的视认和感

知。图 9 的 c-f 为小半径公路长隧道视觉参照系优化前后竖向断面对比,可以直观地发现优化后驾驶人对小半径公路长隧道侧壁的可视范围更广,轮廓诱导能力显著增强。小半径公路长隧道视觉参照系优化方案中设施设置形式与其作用如表 3 所示,优化前后效果评价如表 4 所示。

表3 视线诱导设施设置形式及其作用表现

Tab. 3 Setting form and function performance of visual guiding facilities

视线诱导设施	设置形式	作用表现
突起路标	低位高频设置于路面标线上	明确行车横向路权,提升速度感知,部分线形诱导功能。
线型轮廓标	低位中频设置于检修道路缘	警示性强,增强路缘障碍物可视性,提升距离感,同时起到线形诱导与轮廓诱导作用,线形变化更明晰,优化视距。
腰带线	中位连续设置于隧道侧壁,上下深色包边	包边设计视认性更强,线形诱导作用更显著,有助于明确行车纵向路权,提升方向感,优化视区。
线形诱导标	中位中频设置于隧道侧壁,与腰带线配合设置在弯道外侧,形式为组合式	主要线形诱导,辅助轮廓诱导,提升方向感和线形走向视认,有助于提升弯道曲率感知和方向判断。
隧道轮廓带	高位低频设置于隧道侧壁与拱顶	主要轮廓诱导,辅助线形诱导,明确建筑限界和空间路权,优化视距视区。

表4 优化前后效果评价

Tab. 4 Performance evaluation before and after optimization

优化前后效果	空间路权	驾驶人因	驾驶任务
优化前	行车道边界、检修道路缘、隧道轮廓、线形走向等信息视认不明晰,横/竖/纵向路权不明确。	视距视区均受限,可视距离短;视觉诱导信息不足,容易产生速度、距离、位置、方向等错觉。	车道保持不稳定、车速感知不准确、车距保持不合理,行车方向难以准确辨识,驾驶任务作业困难。
优化后	立体视觉参照系,多层线形诱导与轮廓诱导信息,保证其连续性和一致性,隧道建筑限界与弯道线形清晰,横/竖/纵向路权很明确。	高位、中位和低位的多层次诱导信息冗余,保证驾驶人在弯道路段远端、中断和近端均可清晰明视,合理有效调控驾驶人视错觉。	缓解心理旋转效应,分解驾驶任务,降低驾驶人反应时间,视认感知良好,车辆控制平稳,提升驾驶绩效。

4 结语

小半径公路长隧道因其空间封闭、昏暗、单调的行车环境,以及长距离小半径弯坡线形导致驾驶人视距视区受限,致使小半径公路长隧道内部成为典型弱视觉参照系环境,极易诱发危险驾驶行为。本文针对小半径公路长隧道弱视觉参照系易使驾驶人产生心理旋转效应,损害驾驶绩效的问题,从事故预防和驾驶绩效提升的目标提出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。主要研究结论如下:

- (1)小半径公路长隧道视觉参照系具有诱导信息过渡剧烈、违背驾驶期望和冗余性欠缺等特点,该典型弱视觉参照系极易诱发驾驶人心理旋转效应,亟需对弱视觉参照系进行优化设计,以缓解心理旋转效应带来的消极影响,提升驾驶绩效,保障行车安全。
- (2)根据驾驶人的驾驶任务需求、认知心理学和交通行为学等理论基础,结合视知觉恒常性、整体优先性和多层次诱导三个理论提出小半径公路长隧道视觉参照系优化思路,即通过视线诱导设施合理协同布设,确保视觉参照系的恒常稳定;局部视觉参照系信息与整体行车环境信息一致,且由部分能推断整体;多层次的轮廓诱导与线形诱导,确保信息冗余,提高容错性,以此达到小半径公路长隧道行车安全、舒适、低成本、可持续发展的优化目标。
- (3)提出小半径公路长隧道视觉参照系优化方法,即综合考虑视线诱导信息的设置类型与空间分布特征,通过布设多频率、多尺度、多形状的视线诱导设施,利

用局部视觉参照元素构建与整体行车环境信息相连续一致的参照线索,加强小半径公路长隧道的轮廓诱导与线形诱导,借助高位、中位与低位诱导信息的协同作用构建信息冗余的多层次视觉参照系,有效缓解心理旋转效应带来的负面影响,降低驾驶负荷,提升行车安全水平。

(4)本文提出基于心理旋转效应的小半径公路长隧道视觉参照系优化研究框架,主要是依据认知心理学和交通行为学等理论基础和国内外相关研究成果进行定性分析评价与论述,从理论层面揭示并提出小半径公路长隧道心理旋转效应的产生机理和调控方法,研究成果可应用于小半径公路长隧道、小半径光学长隧道的交通安全提升。在未来研究应开展相应的专项试验,结合驾驶人心理与行为数据进行定量分析与评价。

作者贡献声明:

- 杜志刚:提出研究命题与论文思路。
- 韩磊:负责文献调研与论文撰写。
- 梅家林:负责论文绘图与修订。
- 贺世明:参与研究构思设计与论文修改。
- 杨永正:参与论文撰写与修订。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2022年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京:中华人民共和国交通运输部, 2023.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin of transportation industry development in 2022 [R]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China,

- 2023.
- [2] 裴玉龙. 道路勘测设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
PEI Yulong. Road survey and design [M]. Beijing: People's Communications Press, 2018.
 - [3] PERVEZ A, HUANG H, HAN C, *et al.* Revisiting freeway single tunnel crash characteristics analysis: A six-zone analytic approach[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2020, 142: 105542.
 - [4] KIRCHER K, AHLSTROM C. The impact of tunnel design and lighting on the performance of attentive and visually distracted drivers[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2012, 47: 153.
 - [5] 阎莹, 叶飞, 王晓飞, 等. 隧道群路段环境光照度与驾驶人瞳孔面积分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(12): 89.
YAN Ying, YE Fei, WANG Xiaofei, *et al.* Analysis of ambient illumination and driver's pupil area in tunnel group[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 44(12): 89.
 - [6] ZHAO X, JU Y, LI H, *et al.* Safety of raised pavement markers in freeway tunnels based on driving behavior[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2020, 145: 105708.
 - [7] 张天乐. 高速公路螺旋型小半径曲线隧道线形与照明安全研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.
ZHANG Tianle. The research on safe alignment and lighting in small radius spiral tunnel of highway[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2009.
 - [8] 周海宇. 山区高速公路小半径平曲线隧道交通安全保障技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
ZHOU Haiyu. Study on traffic safety guarantee technology of small radius curve tunnel in mountainous expressway[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
 - [9] BASSAN S. Sight distance and horizontal curve aspects in the design of road tunnels *vs.* highways [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2015, 45(1): 214.
 - [10] 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.
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.
 - [11] 杨理波, 杜志刚, 马兆有, 等. 高速公路隧道小半径圆曲线路段反光环有效性研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(8): 149.
YANG Libo, DU Zhigang, MA Zhaoyou, *et al.* Research on effectiveness of reflective rings for small radius circle curve road section of expressway tunnels[J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(8): 149.
 - [12] 牟星宇, 杨理波, 向一鸣, 等. 基于曲率感知的高速公路隧道弯道路段调控方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(5): 695.
MOU Xingyu, YANG Libo, XIANG Yiming, *et al.* Research on regulate and control method for curved road section of expressway tunnel based on curvature perception[J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(5): 695.
 - [13] SIVAK M. The information that drivers use: Is it indeed 90% visual?[J]. *Perception*, 1996, 25(9): 1081.
 - [14] 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.
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.
 - [15] MARC G, NICOLAS V, BRICE I, *et al.* Does the integration of haptic and visual cues reduce the effect of a biased visual reference frame on the subjective head orientation?[J]. *Plos One*, 2012, 7(4): e34380.
 - [16] 杜志刚, 梅家林, 倪玉丹, 等. 基于视觉需求的城市水下特长隧道光环境评价与优化综述[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(6): 48.
DU Zhigang, MEI Jialin, NI Yudan, *et al.* Review on evaluation and optimization of light environment of extra-long urban underwater tunnel based on visual demands[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(6): 48.
 - [17] 薛继国. 基于眼动和脑电的心理旋转认知机制研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2017.
XUE Jiguo. The cognitive mechanism of mental rotation: An eye movement and EEG study[D]. Beijing: The PLA Academy of Military Medical Sciences, 2017.
 - [18] 郭孜政, 刘仙, 陈瑞雅, 等. 疲劳影响驾驶员心理旋转能力的ERP试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(10): 7.
GUO Zizheng, LIU Xian, CHEN Ruiya, *et al.* ERP-based study on influence of fatigue on drivers' mental rotation ability[J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(10): 7.
 - [19] 王鹏, 游旭群. 空间参照体系对心理旋转的影响[J]. 心理科学, 2008, 31(6): 1339.
WANG Peng, YOU Xuqun. The influence of spatial reference frames on mental rotation[J]. *Journal of Psychological Science*, 2008, 31(6): 1339.
 - [20] 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.
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.
 - [21] 韩世辉. 视觉信息加工中的整体优先性[J]. 心理学报, 2000(3): 337.
HAN Shihui. The global precedence in visual information processing[J]. *Acta Psychologica Sinica*, 2000(3): 337.
 - [22] 刘明慧, 张明, 隋洁. 自我信息对知觉选择中整体优先性的调控作用[J]. 心理学报, 2014, 46(3): 312.
LIU Minghui, ZHANG Ming, SUI Jie. Self-related information modulates global advantage effect in visual selection[J]. *Acta Psychologica Sinica*, 2014, 46(3): 312.
 - [23] 王鑫. 格式塔完形法则在标志设计中的应用分析[J]. 设计, 2017(22): 132.
WANG Xin. The application of gestalt law in logo design[J]. *Design*, 2017(22): 132.
 - [24] JIAO F, DU Z, WONG Y D, *et al.* Self-explaining performance of visual guiding facilities in urban road tunnels based on speed perception[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, 122: 104371.