

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.10.055

高速公路隧道入口段障碍物视认距离实验研究

王 强¹, 杨 轸², 冯 洋²

(1.浙江交工宏途交通建设有限公司,浙江 杭州 310051; 2.同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海市 201804)

摘 要:为研究障碍物视认距离受车速与布置距离的影响,招募了 6 位参与者在 60、80、100 km/h 三个速度水平下进行高速公路隧道实车实验。结果发现,参与者对障碍物的视认距离随着速度的增加而显著减小,在三个速度水平下,视认距离与障碍物布置的位置之间呈现 V 形变化趋势,最短视认距离出现在障碍物离洞口约 60~80 m,其值低于或远低于该设计速度下的停车视距要求。偏相关性分析显示,运行速度、障碍物位置与距洞口 70 m 轴线相对距离这两个指标与障碍物视认距离呈现显著的正相关性。研究成果对当前我国高速公路隧道入口段的照明过渡设计提出更高要求。

关键词:实车实验;隧道入口段;视认距离;障碍物位置

中图分类号: U452

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)10-0244-05

0 引 言

隧道具有缩短公路里程、提高运输效益、节省用地、利用地下空间和保持生态环境等优点。近年来,随着我国公路建造技术的发展和路网结构的进一步优化,公路朝山岭重丘区纵深发展趋势明显,公路隧道增长显著,近五年的隧道数量及里程如图 1 所示。截至 2022 年底,我国公路隧道通车里程 2 500 万延米以上,隧道近 25 000 座^[1]。我国已成为世界上隧道最多、里程最长的国家。然而,公路隧道作为一类埋置于地下的特殊路段,相对敞开段的运行风险更高。

隧道被划分为入口段、中间段以及出口段。白天,驾驶员在穿越隧道过程中,视觉环境需要经历一个从亮到暗、再从暗到亮的过程,视觉环境亮度的骤变往往会给驾驶员带来一些如“黑洞效应”^[2]和“白洞效应”^[3]的视觉感知障碍问题,而隧道入口段的事故数量相对其他区段更多^[4-7],面临的交通安全也更为突出^[8-10]。

针对隧道入口段运行风险,国内外学者通常从照明^[11-12]、心理^[13-14]、行为^[15]等方面切入开展研究。在

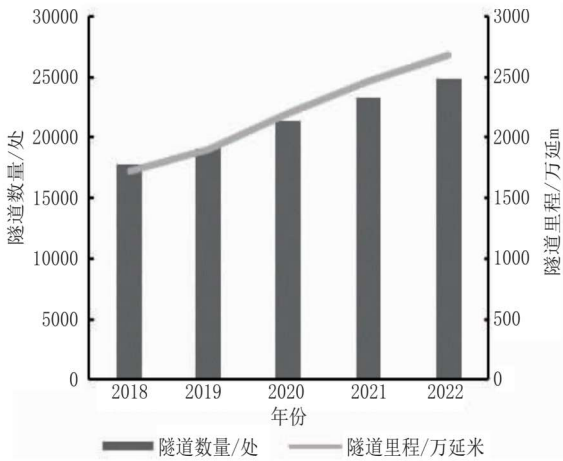


图 1 公路隧道统计

研究方法上,一些学者基于驾驶模拟器开展隧道环境与驾驶行为及心理生理相关性研究,并取得了一定成果^[16-18],但驾驶模拟场景对环境光的表现非常有限,无法真实还原实际驾驶场景,用于研究隧道出入口亮度急剧变化具有天然的缺陷。一些学者基于实车驾驶实验研究隧道入口段视觉特征^[19]、照明安全阈值^[20]、车型影响^[21]对运行安全的影响,在风险评估方面大多采用瞳孔面积变化率^[22]、注视点分布^[23]等指标。这些指标虽然在一定程度上能够反映人的视觉负荷,但是这些指标与驾驶员是否看清路况、看清路表的障碍物并无直接关系,而环境中的障碍物常常成为重大事故的诱因^[24],这方面的研究还很不深入。

本研究拟通过开展实车驾驶实验,研究不同车速水平及障碍物在洞内摆放位置对驾驶员视认性的影

收稿日期: 2023-11-24

基金项目: 浙江交投集团科研项目(202107); 国家自然科学基金资助项目(52372336)

作者简介: 王强(1986—),男,本科,高级工程师,从事道路工程科研与生产工作。

通信作者: 杨轸(1974—),男,博士,副研究员,从事道路安全研究工作。电子信箱: yangzhen5719@tongji.edu.cn

响规律,分析行车风险,寻找提高隧道入口运行安全的可行措施。

1 实验方案与测试

本实验选取的实验地点为浙江诸永(诸暨—永嘉)高速公路 K43+000—K54+000 段。实验时,此段高速公路尚未开放交通,为行车实验提供了必要条件。此条道路中包含有 4 条隧道:雪山隧道、球庄隧道、枫树头隧道、枫树岭隧道,如图 2 所示。隧道均为双洞设计。其中,雪山隧道全长 2 103 m,球庄隧道全长 455 m,枫树头隧道全长 1 643 m,枫树岭隧道全长 1 298 m。本路段隧道均按 80 km/h 设计,隧道内壁 2.5 m 高度内贴浅黄色面砖,反射率约为 50%,拱部反射系数取 25%,所有隧道路面均为沥青路面。隧道照明设计指标取值 $L_{20}(S)=3\ 000\text{ cd/m}^2$,中间段路面照明 $L_{in}\geq 4.5\text{ cd/m}^2$, $L_{th}=0.035\times L_{20}(S)=105\text{ cd/m}^2$ 。隧道灯具为全新状态,实验时全部开启。

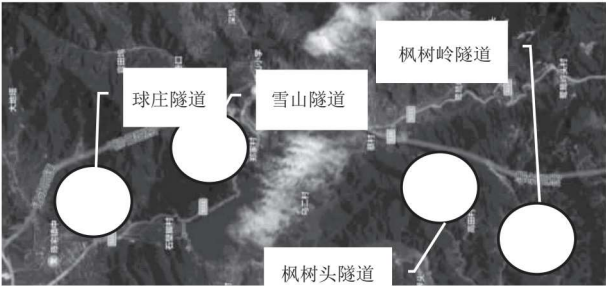


图 2 实验隧道

1.1 实验仪器与实验参与者

(1)机动车非接触速度仪(CTM-8C)

机动车非接触速度仪(CTM-8C)可高精度测量汽车速度、行驶距离、减速度等指标,体积较小,质量较轻,适合行车实验。实验设备外观如图 3 所示,技术指标见表 1。



图 3 CTM-8C 非接触速度仪

(2)障碍物

本研究中设置了不同位置的障碍物以模拟车辆坠落物撒落于隧道内的场景,以判断不同情况下的

表 1 CTM-8C 机动车非接触速度仪技术指标

项目	测量范围	分辨率	精度
速度	0~250.0 km/h	0.1 km/h	0.5%
距离	0~99 999.999 m	1 mm	0.2%
时间	0~99 999.999 s	1 ms	0.1%
减速度	0~9.9 m/s ²	0.1 m/s ²	1%

障碍物视认距离。如图 4 所示,障碍物采用 CIE 建议形式^[25],采用 20 cm×20 cm×20 cm 的纸盒作为主体,外面涂抹水泥,实测反射系数为 0.22。



图 4 模拟障碍物

(3)实验参与者

实验车辆为马自达 PREMACY 普力马汽车(小型车辆),如图 5 所示。实验共有 6 名参与者参加,男性驾驶员 6 名,平均年龄 28 岁,标准差为 4.94;平均驾龄 5.5 a,标准差为 6.28。参与者均通过了驾驶证照考试,矫正视力均在 5.0 以上,身体状况良好,无色弱、色盲。



图 5 实验车辆

1.2 实验过程

在实验过程中,将障碍物摆放在隧道洞口内右车道上的 30~130 m 的任意位置。实验车辆在左车道上行驶,在隧道入口前达到预定速度(60、80、100 km/h)并保持匀速驶入隧道,如图 6 所示。参与者坐在副驾驶位置,当他视认到障碍物时,按下仪器上开始按钮;当车辆经过障碍物时,按下结束按钮,记录非接触式速度仪输出的车辆行驶速度及被试者对障碍物的视认距离(即两次按键时间内车辆所前

进的距离)。每次实验中,障碍物离洞口的摆放位置在 30~130 m 范围内随机调整,每位驾驶员完成一组包含有明显最短视认距离的测试实验。

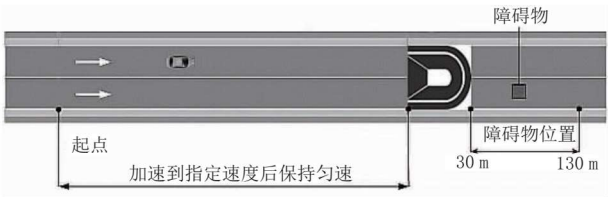


图 6 实验流程示意图

2 实验结果分析

2.1 视认距离与车速关系分析

(1)描述性分析

各个速度水平下的视认距离分布如图 7 所示。从中可以发现,数据的离散性处于可以接受的范围。60 km/h 的数据较为集中,但 80、100 km/h 条件下,障碍物视认距离数据的中位数、极值、标准差间等都有着显著的差别。总体而言,不同速度水平下的障碍物视认距离呈现 60 km/h>80 km/h>100 km/h 的趋势。

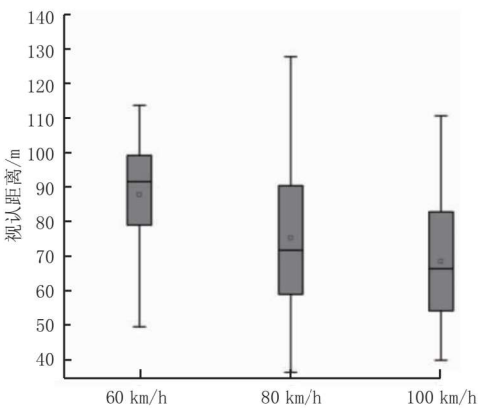


图 7 三个速度水平下视认距离箱线图

(2)单因素重复测量方差分析

本研究中,6 名参与者进行了多次不同速度水平下的视认距离的考察实验,因此需要进行单因素重复测量方差分析,以考察车速对视认距离的影响效应。

重复测量方差分析的应用前提是各项数据需进行莫奇来球形度检验,并依据检验结果确定是否需要采纳 Epsilon 修正后的结果。

由表 2 可知,检验 Sig.大于 0.05,满足球形假设,不需进行 Epsilon 修正,可继续进行主体内效应检验,检查速度对视认距离的影响效应。

从表 3 结果可以看到,车辆速度对视认距离的影响,显著性小于 0.05,影响显著; η^2 效应量为

表 2 莫奇来球形度检验

自变量	因变量	莫奇来 W	近似卡方	自由度	Sig.	Epsilonb 格林豪斯 - 盖斯勒
车辆速度	视认距离	0.980	0.082	2	0.960	0.980

0.504,效应量属于“大”的范畴^[26],说明车辆速度对视认距离的影响十分显著。

表 3 主体内效应检验

自变量	因变量	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	Sig.	η^2
车辆速度	视认距离	194 6.092	2	973.046	5.085	0.030*	0.504

2.2 视认距离与布置距离关系分析

(1)单一个体被试变化描述性分析

本次实验日期为 12 月 16—17 日,时间为 9:00—16:30,实验过程中洞外照度变化剧烈(4 700~35 400 lx)。为分析相对稳定的洞外照度水平下障碍物摆放位置与视认距的关系,选择实验时间为 11:00—13:00 某个体驾驶员的实验数据进行控制变量(洞外照度水平为 26 800~35 400 lx)分析。

从图 8 可以看出,视认距离随障碍物距洞口距离呈现出 V 形变化,并且当障碍物放置在距入口 60~80 m 范围内存在视认距离低谷,最低处不足 50 m,显著低于三个速度水平下停车视距(分别是 56、100、158 m)的要求,安全隐患突出。

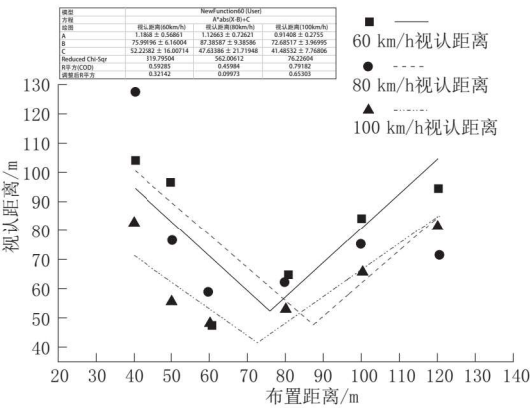


图 8 单一个体在三个速度水平下障碍物距洞口距离与视认距离关系

出现上述现象的原因是,隧道距隧道洞口 60 m 范围内,隧道内照度受洞外自然光的影响较大,特别是障碍物正立面获得的照度显著,驾驶员可获得的视认距离大。在 80 m 后,驾驶员感知到障碍物时已经进入到了隧道内,经过剧烈亮度变化后已完成部分暗适应,恢复了一定视认能力,因此视认距离呈现增大趋势。而在 60~80 m 范围中,驾驶员光照环境的急

剧变化中,视觉感知能力低,视认性差。

(2)多参与者变化描述性分析

为分析多名驾驶员在较大范围洞外照度水平下视认距离与洞内障碍物摆放位置的变化范围,以便获得更具普遍意义的结论,本研究将所有的测试数据纳入进来进行相关性分析。从图 9 可发现,驾驶员视认距离与障碍物布设位置呈现与单一个体相同的规律,视认距离最短处也近似发生在障碍物距洞口 60~80 m 的位置,并且其值也低于或远低于该设计速度下的停车视距要求。

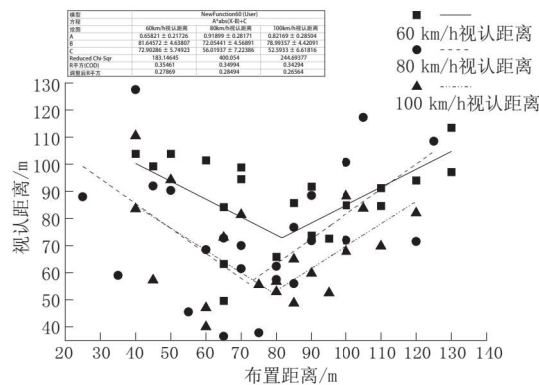


图 9 三个速度水平下障碍物距洞口距离与视认距离关系
(多人多照度水平)

(3)相关性分析

在发现这一趋势后,需要对视认距离与布置距离间的相关性进行分析,证实此现象是否具有统计学意义。由于视认距离和布置距离均为连续变量,且需控制速度对两者的影响,故采用偏相关分析。利用 SPSS 软件对布置距离与视认距离进行偏相关分析后,结果见表 4。控制速度影响后,布置距离与视认距离的相关性系数为 0.041,Sig 值为 0.377,布置距离的变化与视认距离的变化之间并无显著的线性相关性,但是仍有存在非线性相关的可能性。

表 4 布置距离与视认距离偏相关分析

控制变量		视认距离	布置距离
速度	视认距离	1.000	0.041
	Sig.(单尾)	—	0.377
	自由度	0	60
速度	布置距离	0.041	1.000
	Sig.(单尾)	0.377	—
	自由度	60	0

因此,考虑到视认距离随障碍物距洞口位置 V 形变化规律,并且转折变化区间在 60~80 m。以 70 m 为对称轴,考察相对对称轴的障碍物距洞口距离与障碍物视认距离的关系,发现两者间有着强烈的相

关性,相关性达到 0.490,Sig. 值达到 0.000,小于 0.001,结果见表 5。

表 5 相对 70 m 对称轴的障碍物距洞口距离与视认距离偏相关分析

控制变量		视认距离	相对 70 m 对称轴的障碍物距洞口距离
速度	视认距离	1.000	0.490
	Sig.(单尾)	—	0.000
	自由度	0	60
相对 70 m 对称轴的障碍物距洞口距离			
速度	相关性	0.490	1.000
	Sig.(单尾)	0.000	—
	自由度	60	0

这一情况以线性相关图来表示,即图 10。

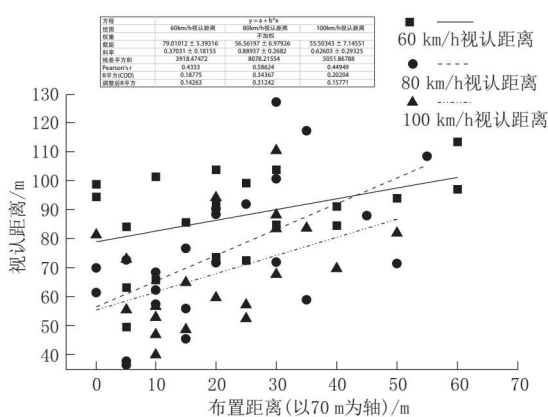


图 10 三个速度水平下视认距离相对 70 m 对称轴的障碍物距洞口距离的变化关系

3 结 论

通过对实车实验的结果分析,可得出下面结论:

(1)运行速度对障碍物视认距离的影响在统计学上具有显著性,速度越大,驾驶员对障碍物视认距离越小,各速度水平下障碍物视认距离呈现 60 km/h>80 km/h>100 km/h 的趋势。

(2)视认距离与障碍物布置的位置之间呈现 V 形变化趋势,最短视认距离出现在障碍物离洞口约 60~80 m 处,其值低于或远低于该设计速度下的停车视距要求,表明现有的隧道设计在入口段存在明显的安全隐患。

(3)偏相关性分析显示,运行速度、障碍物位置与距洞口 70 m 轴线相对距离这两个指标与障碍物视认距离呈现显著的正相关性。

(4)本研究仍然有着一定的缺陷,如参与者招募

较少,未对车型、障碍物类型进行考察等。未来应当增加更多实验变量,并招募更多样的参与者进行实验,验证实验得出结论的可靠性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部综合规划司. 2022 年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL] 2023, Ministry of Transport of the People's Republic of China. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html.
- [2] Wang S, Huang X. Analysis of Methods on Evaluating the "Black Hole Effect" in Tunnel Entrance Zones[C]. CICTP 2015, F, 2015.
- [3] Hu J, Gao X. Mechanism of the "White Hole" Phenomenon and Relative Security Technology in the Tunnel[C]. International Conference on Transportation and Development 2018, F, American Society of Civil Engineers Reston, VA, 2018.
- [4] 张生瑞,马壮林,石强.高速公路隧道群交通事故分布特点及预防对策[J].长安大学学报(自然科学版),2007,27(1): 63-66.
- [5] 张璇,唐进君,黄合来,等.山区高速公路隧道路段与开放路段的事故影响因素分析[J].交通信息与安全,2022,40(3): 10-18.
- [6] Ma Z-l, Shao C-f, Zhang S-r. Characteristics of traffic accidents in Chinese freeway tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(3): 350-355.
- [7] Amundsen F H, Engebretsen A. Studies on Norwegian road tunnels II: An analysis on traffic accidents in road tunnels 2001-2006[J]. 2009:
- [8] 张玉春,何川,方勇,等.高速公路隧道群交通事故风险致因分析[J].中国安全科学学报,2009,19(9): 120-124.
- [9] 梅家林,杜志刚,郑号染,等.不同时段特长隧道入口区域视觉负荷研究[J].中国安全科学学报,2021,31(6): 176.
- [10] 罗杰,陆百川,徐进,等.山地城市隧道照度与速度对驾驶负荷的影响[J].重庆理工大学学报(自然科学),2019,33(6): 13-23,58.
- [11] 胡江碧,马文倩.基于驾驶视认需求的隧道入口段光环境研究[J].上海交通大学学报,2015,49(4): 464-469.
- [12] Du Z-g, Huang F-m, Yan X-p, et al. Light and dark adaption times Based on pupil area variation at entrance and exit areas of highway tunnels[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2014, 8(1): 73-77.
- [13] Feng Z, Yang M, Zhang W, et al. Effect of longitudinal slope of urban underpass tunnels on drivers' heart rate and speed: A study based on a real vehicle experiment[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018(81): 525-533.
- [14] Yang Y, Feng Y, Easa S M, et al. Evaluation of mental load of drivers in long highway tunnel based on electroencephalograph[J]. Frontiers in Psychology, 2021(12): 646406.
- [15] Yang Y, Feng Y, Easa S M, et al. Sound effects on physiological state and behavior of drivers in a highway tunnel[J]. Frontiers in psychology, 2021(12): 693005.
- [16] 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.
- [17] 潘福全,梁雪,王琳,等.基于驾驶仿真的海底隧道出入口段视觉减速标线有效性[J].科学技术与工程,2022,22(21): 9372-9380.
- [18] 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.
- [19] 赵炜华,刘浩学,刘玮,等.高速公路隧道群出、入口段驾驶人视觉特征[J].交通科学与工程,2011,27(3): 75-81.
- [20] 胡江碧,李然,马勇.高速公路隧道入口段照明安全阈值评价方法[J].中国公路学报,2014,27(3): 92-99.
- [21] 陈云,杜志刚,焦方通,等.小半径公路短隧道入口段不同车型视觉负荷研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2019,43(4): 708-711.
- [22] 尚婷,唐伯明,段萌萌.基于驾驶员瞳孔面积变化率的公路视错觉减速标线横向宽度研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(1): 111-116.
- [23] 文竞舟,王朝,杜志刚,等.山区小半径光学长隧道注视点分布及转移研究[J].交通信息与安全,2019,37(6): 40-47.
- [24] 陈鹏,潘晓东,付志斌,等.城市隧道出入口视觉适应性研究[J].交通标准化,2014,42(19): 1-6.
- [25] Mehri A, Hajizadeh R, Dehghan S F, et al. Safety evaluation of the lighting at the entrance of a very long road tunnel: a case study in Ilam [J]. Safety and Health at Work, 2017, 8(2): 151-155.
- [26] Cohen J. Eta-squared and partial eta-squared in fixed factor ANOVA designs[J]. Educational and Psychological Measurement, 1973, 33(1): 107-112.

(上接第 216 页)

应保持 25 mm/min 匀速推进;

(2) 由于盾构大坡度、小曲率半径的穿越轨道交通隧道时,应两侧设定不同比例的同步浆液压力,确保盾尾间隙的有效填充。

参考文献:

- [1] 魏纲,杨波,俞国骅.盾构不同穿越形式引起既有盾构隧道变形机理分析[J].现代隧道技术,2018,55(增刊 2): 1020-1027.

- [2] 张宝刚,谢家冲,黄昕.盾构上穿下既有双线隧道相互作用机制的三维数值分析[J].中外公路,2023,43(6): 247-252.
- [3] 蒋磊,陈立,陈松.地铁隧道近距离穿越既有老旧隧道方案设计[J].土工基础,2024,38(1): 24-28.
- [4] 谢雄耀,张永来,周彪,等.盾构隧道下穿老旧建筑物群微沉降控制技术[J].岩土工程学报,2019,41(10): 1781-1789.
- [5] 刘凤洲,谢雄耀,王强,等.盾构施工沉降多源数据实时交互平台开发[J].隧道建设(中英文),2020,40(增刊 1): 82-89.