

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.03.008

引用格式: 张旭, 李英帅, 杨昆霖. 城市隧道照明对驾驶人视觉特性的影响分析[J]. 公路与汽运, 2024, 40(3): 37-41.

Citation: ZHANG Xu, LI Yingshuai, YANG Kunlin. The influence of urban tunnel lighting on drivers' visual characteristics[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(3): 37-41.

城市隧道照明对驾驶人视觉特性的影响分析*

张旭¹, 李英帅², 杨昆霖²

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 车辆驶过隧道时在隧道内外会产生“黑洞效应”和“白洞效应”, 优化隧道照明设施, 减少“黑洞效应”和“白洞效应”对驾驶员视觉的影响, 有助于提高行车安全性。文中通过对南京扬子江隧道与南京长江隧道进行实车试验, 采集隧道内外亮度数据、驾驶人眼动特征数据, 对隧道入口段、出口段和中间段的驾驶人眼动数据进行有效差异显著性分析。结果表明, 2条隧道的出入口亮度差异均对驾驶员的注视点变化特征有显著影响; 扬子江隧道的出入口亮度对驾驶员的扫视变化有显著影响且驾驶员眨眼时间影响明显增长, 长江隧道的出入口亮度变化对驾驶员扫视变化的影响较小, 应对扬子江隧道照明进行改善。

关键词: 交通工程; 城市隧道; 隧道照明; 驾驶人; 视觉特性

中图分类号: U491.53

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)03-0037-05

由于隧道本身的结构特点, 行车过程中, 驾驶人会经历“黑洞效应”和“白洞效应”, 对驾驶人视觉信息的获取与处理产生影响, 驾驶人在进出隧道时视觉的不适应是造成城市隧道交通事故的主要原因^[1]。针对该问题, 国内外专家学者在不同方向进行了许多研究。在隧道照明方面, 日本编制了《照明手册》, 其中包含很多学者对隧道照明的研究成果^[2]; Narisada K. 等通过动态模拟试验人员通过隧道的过程, 分析了试验人员注视隧道内物体的时间与隧道背景亮度的关系^[3]; 针对隧道内外亮度差较大的问题, 文献[4]开发了智能控制系统、研究了灯具照明参数, 文献[5]研究了灯具分布情况, 文献[6-8]从隧道外修建遮光棚、加装隔离膜、利用阳光增加隧道内亮度等方面提出了提升隧道内外亮度一致性的优化方法; 国际照明委员会(International Commission on Illumination, CIE)提出了隧道照明推荐值, 并指出驾驶人驾驶车辆驶入隧道时眼睛会有一个适应过程, 该适应过程取决于驾驶人之前的照明史^[9]。在隧道照明对驾驶员视觉影响方面, 张鹏等对隧道进出口驾驶人明暗适应特性进行研究, 得出隧道进出口明暗适应时间为 1.6~2.6 s^[10]; 张扬帆等利用眼动仪, 通过实地实车试验, 得出短隧道照明

环境不同对驾驶人的生理影响较大, 应结合安全、运营等因素决定短隧道是否设置照明^[11]; 施卢丹等通过眼动仪采集行车过程中驾驶员视觉特征参数, 数据分析结果表明, 灯光带对驾驶人视觉特性有明显影响但不会吸引驾驶人的长时间注意, 由于长隧道容易给驾驶人带来单调疲劳感, 须减轻环境单调对驾驶人的影响^[12]; 彭力等建立 4 种工况照明模型, 通过眼动仪测试, 得到照明运营时满足驾驶人视觉需求的最低功率值^[13]; 胡英奎等通过研究车辆行驶过程中驾驶人瞳孔大小的变化, 计算得到了人眼瞳孔变化速率达到最大或最小时隧道照明亮度^[14]; 杜志刚等对驾驶人的瞳孔面积与隧道出入口的照度进行研究, 得到瞳孔面积的临界变化速度为 $-6 \sim 4 \text{ mm}^2/\text{s}$ ^[15]。在基于驾驶员视觉特性的隧道照明优化方面, 郭海龙、杜峰、玮宝、李然等基于驾驶人视觉特性分别对公路隧道的路肩设计、隧道照明设计、隧道入口外段遮光构件及灯具安装高度和角度等进行了优化^[16-20]。现有研究主要关注公路隧道中驾驶人视觉特性, 对照明与驾驶人视觉特性关系的研究较少, 且对城市隧道的研究不足。本文通过实车试验, 利用眼动仪、照度计等设备同步采集驾驶人贯穿城市隧道全过程中的眼动参数及亮度参数, 分析

* 基金项目: 南京工业大学青年教师科研启动基金项目(3827400205)

城市隧道照明对驾驶人视觉特性的影响,为城市隧道照明设施优化提供理论依据。

1 实车试验设计

通过隧道路段实车试验,研究隧道光环境对驾驶人视觉特性的影响。为排除不同驾驶人之间视觉特性差异带来的干扰,选取一名驾驶人作为试验对象。试验驾驶人为男性,35岁,具有5年以上驾驶经验,累计行驶里程3万km,其驾驶风格稳健,驾驶技术熟练。

采用德国SMI公司设计的Red & Hed型眼动

仪(V3.0)采集驾驶人眼动参数,该仪器主要由3个摄像头、1个音频采集器构成,视频采集频率为30 Hz,眼动追踪频率为60 Hz,自质量为50 g。其形状如同普通镜框眼镜,简单易用,可以高速采集双眼位置与各项数据。

采用深达威SW-1500A测距仪测量试验起始点与隧道口的距离,采用深达威SW-582光照度计测量试验中隧道光照度的变化。

考虑到城市道路中主体车辆是小轿车,采用丰田卡罗拉作为试验车。试验路段选取江苏省南京市长江隧道和扬子江隧道,两隧道的参数指标见表1。

表1 试验隧道的参数指标

隧道名称	盾构直径/m	长度/m	限速/(km·h ⁻¹)	通行方式	是否LED	灯具间距/m
长江隧道	14.93	6 042	80	双向六车道	是	6.0
扬子江隧道	非盾构	7 368	70	双管双层八车道	是	3.5

试验时间:2019年5月21日(星期二)9:00—15:00。

试验地点:南京市长江隧道、扬子江隧道。

气候条件:天气晴朗。

交通环境:交通流量适中,通行速度适中。

试验人员:驾驶员,指令员,设备操作员。

试验过程:试验驾驶员按要求佩戴眼动仪,依照指令员的指令关注目标物,设备操作人员根据驾驶员的眼动情况标定眼动仪参数,确定眼动参数的精确度。试验车辆往返2条隧道各6次。

眼动数据及视频以xml和avi等形式保存在配套的存储卡中。眼动数据由SMI眼动仪配套软件Bezaze进行分析,得到驾驶人的眼动情况,如注视点的位置及随时间的移动轨迹、扫视幅度、眨眼次数和持续时间等。光的照度数据由照度计采集并自动保存,数据采集与眼动数据采集同步进行。

2 数据处理与分析

2.1 隧道亮度变化特征

在隧道外,亮度主要取决于天气状况。但在隧道内,亮度主要来自隧道内灯光,亮度由照度产生,影响驾驶员的视觉感受。为方便进行数据分析,将采集的照度(单位:lx)数据换算成亮度(单位:cd/m²)数据。2条隧道的亮度变化见图1。

由图1可知:2条隧道的亮度变化规律基本一致,在隧道入口处亮度迅速降低,在进入隧道50 m

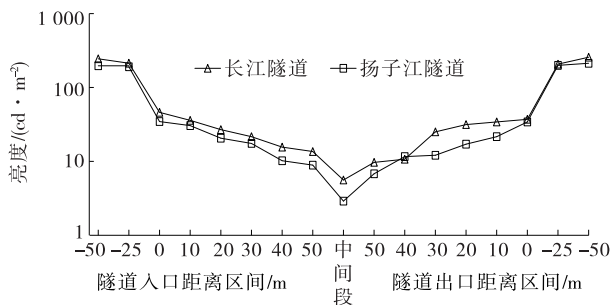


图1 隧道的亮度变化

后亮度变化平稳,在距离隧道出口50 m处亮度逐渐提高,在出口处亮度迅速提高;亮度值变化的起点和终点基本稳定在距离隧道洞口50 m处,因此将距离隧道洞口内外50 m定义为隧道出入口段,隧道内其他部分为隧道中间段;长江隧道内部亮度整体高于扬子江隧道。

2.2 注视点变化特征

驾驶人在隧道中多次或长时间注视的点称为注视点。隧道内注视点变化不仅受驾驶人本身心理、生理特性的影响,也受隧道亮度的影响。注视点持续时间可以反映驾驶人对交通环境的判断效率,通过分析同一驾驶人对不同隧道不同路段的注视状况,可以得出不同隧道亮度对驾驶员视觉特性的影响,据此进行隧道亮度优化。

2.2.1 注视点分布特征

图2为驾驶人在扬子江隧道和长江隧道出入口段和中间段的注视点热点图。

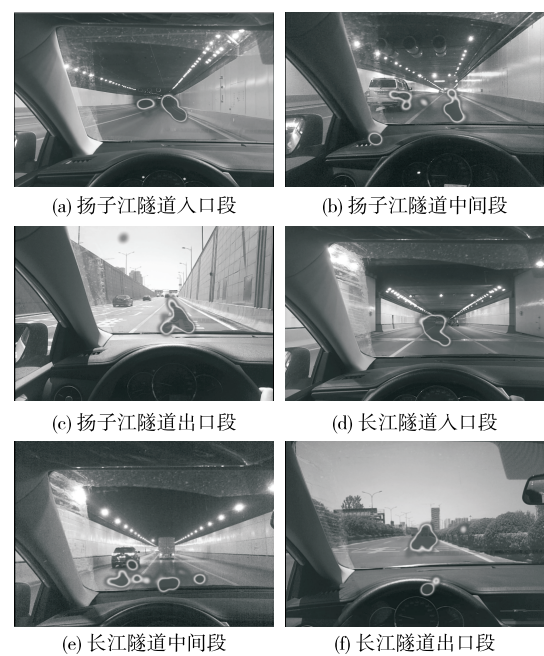


图 2 试验驾驶人注视点热点图

由图 2 可知:在隧道出入口附近,驾驶人注视点为道路中心,而在隧道中间段,驾驶人注视点较分散,驾驶人在隧道内的注视点呈集中—分散—集中的分布特征。

结合隧道亮度变化特征,驾驶人在隧道出入口的明适应和暗适应是造成驾驶员注视点集中的主要原因。因此,提高隧道出入口亮度,降低隧道口内外亮度差,可有效减少驾驶人的视觉压力,提高驾驶安全性。

2.2.2 注视点持续时间

统计试验驾驶人在通过 2 条隧道入口段、中间段及出口段的注视点持续时间并进行均值及标准差计算,结果见表 2。由表 2 可知:驾驶员通过隧道出入口段的注视点持续时间长于通过中间段的注视点持续时间。

表 2 注视点持续时间分析

隧道名称	路段	注视点持续时间	
		平均值/s	标准差
扬子江隧道	入口段	0.259 498	0.124 344
	中间段	0.223 755	0.118 106
	出口段	0.249 610	0.126 188
长江隧道	入口段	0.261 919	0.088 455
	中间段	0.224 837	0.122 939
	出口段	0.277 279	0.158 349

为了解隧道入口段和出口段驾驶员注视点持续时间与中间段注视点持续时间是否存在显著差异,进行曼-惠特尼检验,结果见表 3。由表 3 可知:2 条隧道入口段驾驶员注视点持续时间与中间段注视点持续时间的渐近显著性都小于 0.05,出口段驾驶员注视点持续时间与中间段驾驶员注视点持续时间的渐近显著性都大于 0.05,说明入口段与中间段的注视持续时间存在显著差异,出口段与中间段的注视持续时间差异不显著。

表 3 注视点持续时间的曼-惠特尼检验

隧道名称	路段	曼-惠特尼 U 值	Z 值	渐近显著性(双尾)
扬子江隧道	入口段与中间段	7 751.5	-2.515	0.010
	出口段与中间段	4 089.0	-1.362	0.170
长江隧道	入口段与中间段	28 859.0	-2.430	0.010
	出口段与中间段	17 737.5	-0.289	0.772

结合隧道内外亮度变化特征,在进入隧道时,由于暗适应的作用,驾驶员需要较长时间调整瞳孔大小,注视点持续时间一般不会发生变化;从隧道出来是一个由暗至明的过程,由于明适应所需时间少于暗适应,注视点持续时间少于进入隧道时。

2.3 扫视变化特征

扫视产生于两次注视之间。扫视时眼睛不总是做平滑运动,很多时候是做跳跃运动,故扫视又称为眼跳。通过扫视,实现对视野范围的快速搜索和对刺激信息的选择,具有扫视幅度和扫视速度两个特征。夜间由于环境照明不良,容易造成驾驶人视觉疲劳,导致扫视幅度和扫视速度下降,降低驾驶人对交通环境的有效判断,进而影响驾驶安全。

2.3.1 扫视幅度变化分析

扫视幅度在一定程度上反映驾驶员的视野范围。统计驾驶员在 2 条隧道入口段、中间段、出口段的扫视幅度并进行平均值和标准差计算,结果见表 4。由表 4 可知:驾驶员在 2 条隧道出入口段的扫视幅度大于在中间段的扫视幅度。

对扫视幅度进行曼-惠特尼检验,结果见表 5。由表 5 可知:扬子江隧道出入口段驾驶员扫视幅度与中间段驾驶员扫视幅度的渐近显著性 ≤ 0.05 ,驾驶员在出入口段与中间段的扫视幅度差异显著;长江隧道出入口段驾驶员扫视幅度与中间段驾驶员扫视幅度的渐近显著性均大于 0.05,驾驶员在出入口

表 4 扫视幅度分析

隧道名称	路段	扫视幅度	
		平均值/ $[(^{\circ}) \cdot s^{-2}]$	标准差
扬子江隧道	入口段	2.154 091	2.354 968
	中间段	1.905 217	2.069 820
	出口段	2.019 310	1.746 022
长江隧道	入口段	2.207 593	2.499 375
	中间段	2.067 832	1.533 001
	出口段	2.518 980	2.516 406

段与中间段的扫视幅度差异不显著。

表 5 扫视幅度的曼-惠特尼检验

隧道名称	路段	曼-惠特尼 U 值	Z 值	渐近显著性(双尾)
扬子江隧道	入口段与中间段	6 124.5	-1.766	0.050
	出口段与中间段	4 123.5	-1.318	0.020
长江隧道	入口段与中间段	30 137.5	-0.401	0.689
	出口段与中间段	13 565.0	-0.373	0.710

结合隧道亮度变化特征,在扫视幅度上,长江隧道的内外亮度差对驾驶员视觉的影响小于扬子江隧道,长江隧道的照明布设优于扬子江隧道。

2.3.2 扫视速度变化分析

在行车过程中,扫视速度反映驾驶员的视觉紧张程度,扫视速度越快,驾驶压力越大。统计驾驶员在 2 条隧道入口段、中间段、出口段的扫视速度并进行平均值和标准差计算,结果见表 6。由表 6 可知:驾驶员在 2 条隧道出入口段的扫视速度高于在中间段的扫视速度。

表 6 扫视速度分析

隧道名称	路段	扫视速度	
		平均值/ $[(^{\circ}) \cdot s^{-1}]$	标准差
扬子江隧道	入口段	40.550 8	25.317 6
	中间段	37.455 7	29.946 1
	出口段	41.583 7	29.228 6
长江隧道	入口段	40.774 7	22.767 0
	中间段	39.402 0	19.337 3
	出口段	42.097 9	30.642 6

对扫视速度进行曼-惠特尼检验,结果见表 7。由表 7 可知:扬子江隧道入口段与中间段的驾驶人

扫视速度差异显著;扬子江隧道出口段与中间段及长江隧道出入口段与中间段的驾驶人扫视速度差异不显著。长江隧道出入口的灯光亮度布设和扬子江隧道出口段的灯光布设对人眼扫视速度的影响较小,而扬子江隧道入口段灯光布设对人眼扫视速度的影响较大,进一步说明长江隧道的照明布设优于扬子江隧道。

表 7 扫视速度的曼-惠特尼检验

隧道名称	路段	曼-惠特尼 U 值	Z 值	渐近显著性(双尾)
扬子江隧道	入口段与中间段	6 095.5	-2.070	0.038
	出口段与中间段	4 084.5	-1.465	0.143
长江隧道	入口段与中间段	28 899.0	-0.326	0.744
	出口段与中间段	15 520.5	-0.460	0.646

2.4 眨眼变化特征

眨眼时间是指人眨眼一次需要的时间,人眼平均眨眼时间为 0.2~0.4 s。2 条隧道不同路段驾驶人眨眼的平均时间见表 8。由表 8 可知:驾驶人在隧道中间段行驶时的眨眼时间在平均眨眼时间范围内,但在隧道出入口段的眨眼时间明显延长,其中在扬子江隧道出口段的眨眼时间最长,扬子江隧道出口段光亮度变化给驾驶人带来的不适感最严重。驾驶人在隧道出入口段行驶时,通过无意识地延长眨眼时间来适应光亮度变化,当其适应了隧道光亮强度时,眨眼时间不再受隧道内亮度的影响。

表 8 驾驶员眨眼时间分析

隧道名称	路段	驾驶员眨眼时间	
		平均值/s	标准差
扬子江隧道	入口段	0.793 625 27	1.035 037 27
	中间段	0.273 028 82	0.218 299 63
	出口段	1.474 029 83	1.372 364 94
长江隧道	入口段	0.734 826 14	0.756 791 49
	中间段	0.209 827 48	0.049 733 15
	出口段	0.492 989 43	0.786 701 88

3 结论与建议

使用眼动仪与照度计进行城市隧道实车试验,分析驾驶人进出隧道过程中眼动特性(注视、扫视、眨眼),研究城市隧道照明对驾驶人视觉特性的影响。结论如下:

(1) 驾驶人在进出隧道时,受明暗适应作用,隧道出入口段注视点较集中,隧道中间段注视点较分散。

(2) 驾驶人在隧道入口段的注视时间长于隧道中间段与出口段的注视时间,说明驾驶人暗适应时间长于明适应时间。

(3) 相比于长江隧道,扬子江隧道的内外光亮强度差异较大,对驾驶员扫视幅度影响显著,须进行照明改造。

(4) 相比于长江隧道及扬子江隧道出口段,扬子江隧道入口段的内外亮度差异对驾驶员扫视速度的影响显著,须优化照明布设。

(5) 眨眼时间随着光亮强度差异增加而延长。在长江隧道,驾驶人在入口段的暗适应对眨眼时间的延长效果强于出口段的明适应;而在扬子江隧道,结果刚好相反。

根据以上研究结果,建议加强扬子江隧道出入口段照明亮度,降低隧道内外光亮强度差异;优化长江隧道入口段的照明。

参考文献:

- [1] 卓艳冲,邵飞,郭唐仪.城市隧道驾驶人注视特征分析[J].交通信息与安全,2014,32(6):101-105.
- [2] 照明学会编.照明手册[M].李农,杨燕,译.北京:科学出版社,2005.
- [3] NARISADA K, YOSEIOKAWA K. Tunnel entrance lighting: effect of fixation point and other factors on the determination of requirements[J]. Lighting Research & Technology, 1974, 6(1): 9-18.
- [4] PACHAMANOV A, PACHAMANOVA D. Optimization of the light distribution of luminaries for tunnel and street lighting[J]. Engineering Optimization, 2008, 40(1): 47-65.
- [5] LEITAO S, PIRES E J S, DE MOURA OLIVEIRA P B. Road tunnels lighting using genetic algorithms[C]// 2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems. November 8—12, 2009. Curitiba. IEEE, 2009: 1-6.
- [6] ONAYGIL S, GÜLER Ö, ERKIN E. Determination of the effects of structural properties on tunnel lighting with examples from Turkey[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(1): 85-91.
- [7] GIL-MARTÍN L M, PEÑA-GARCÍA A, HERNÁNDEZ-MONTES E, et al. Tension structures: a way towards sustainable lighting in road tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(1): 223-227.
- [8] PEÑA-GARCÍA A, GIL-MARTÍN L M, HERNÁNDEZ-MONTES E. Use of sunlight in road tunnels: an approach to the improvement of light-pipes' efficacy through heliostats[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 60: 135-140.
- [9] International Commission on Illumination (CIE). Tunnel entrance lighting: a survey of fundamentals for determining the luminance in the threshold zone[R]. CIE Technical Report 61—1984, Vienna, Austria, 1984.
- [10] 张鹏,梁广山,张明明,等.隧道进出口驾驶人明暗适应特性研究[J].公路与汽运,2023(4):35-40+44.
- [11] 张扬帆,魏清华,梁波,等.公路短隧道照明环境对驾驶员生理的影响[J].照明工程学报,2018,29(2):80-84.
- [12] 施卢丹,刘浩学,赵炜华,等.特长隧道灯光带对驾驶员视觉信息获取的影响[J].公路,2011,56(6):213-217.
- [13] 彭力,翁季,张青文,等.不同照明水平下驾驶员发现隧道内障碍物能力研究[C]//中国照明学会.2018年中国照明论坛:半导体照明创新应用暨智慧照明发展论坛论文集.北京:中国照明学会,2018:29-35.
- [14] 胡英奎,陈仲林,张青文,等.考虑驾驶员视觉适应的公路隧道入口段亮度确定方法[J].土木建筑与环境工程,2016,38(4):20-26.
- [15] 杜志刚,潘晓东,郭雪斌.高速公路隧道进出口视觉适应实验[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(12):1998-2001.
- [16] 郭海龙.基于行车安全性的山区高速公路合理路肩宽度研究[D].西安:长安大学,2005.
- [17] 杜峰,翁季,张青文,等.基于视觉功效法的公路隧道照明研究方案设计[J].灯与照明,2016,40(1):19-23.
- [18] 玮宝,翁季,黄新月,等.基于视觉适应的隧道入口外段遮光构件设计研究[J].灯与照明,2014,38(2):15-21.
- [19] 郭创川.遮阳棚在公路隧道洞口减光中的应用[J].广东公路交通,2016(4):114-117.
- [20] 李然,申瑞君,吴关.公路隧道照明灯具最佳安装位置研究[J].公路,2015,60(10):268-272.

收稿日期:2023-07-05