

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.04.007

隧道进出口驾驶人明暗适应特性研究

张鹏<sup>1</sup>, 梁广山<sup>2</sup>, 张明明<sup>2</sup>, 张鹏举<sup>3</sup>

(1.山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250002;2.山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014;3.山东淮海水利工程有限公司, 山东 济南 250109)

**摘要:**隧道洞口光环境的剧烈变化是影响隧道行车安全的重要因素。为进一步明确驾驶人进出隧道的明暗适应时间,提高行车安全性,文中通过实车试验采集福银(福州—银川)高速公路陕西境内某路段驾驶人进出隧道时的瞳孔直径、照度及车速等数据,按照度分布规律确定瞳孔数据分布范围,并采用数理统计方法得到瞳孔换算震荡时间和空间分布特性。结果表明,隧道进出口明暗适应时间为 1.6~2.6 s。

**关键词:**交通安全;公路隧道;进出口;明暗适应时间

**中图分类号:**U491.26

**文献标志码:**A

**文章编号:**1671-2668(2023)04-0035-06

随着高速公路的快速发展,中国公路隧道数量和长度逐年增加。截至 2020 年,公路隧道数量达 21 316 条,总长度为 2 199.9 万 m,其中特长隧道 1 394 条、长隧道 5 541 条<sup>[1]</sup>。公路隧道的快速发展和建设规模的不断扩大带来大量交通安全问题<sup>[2]</sup>。据调查,隧道进出口 300 m 范围为交通事故高发段,主要安全因素为车辆进出隧道洞口的明暗适应变化<sup>[3-4]</sup>。

隧道进出口驾驶环境的变化主要是光照强度改变,会在一定程度上加剧驾驶人行车紧张心理,影响行车安全,可能诱发交通事故。部分学者针对车辆进出隧道时的明暗适应变化进行了一定研究,如叶飞等以包茂(包头—茂名)高速公路西柞(西安—柞水)段为例,研究了隧道群典型区段以瞳孔面积为特征参数的驾驶人视觉明暗适应规律<sup>[5]</sup>;李俊德等基于瞳孔直径变化分析了隧道明暗适应距离,认为在出隧道口前的 125 m 处驾驶人进入明适应状态,其瞳孔直径急剧变小,在出隧道 50 m 后瞳孔直径恢复至正常状态<sup>[6]</sup>;王健等提出采用隧道出入口扩宽法、遮光棚设置法和自然光引入法改善“白洞效应”

和“黑洞效应”<sup>[7]</sup>;赵郁认为在隧道出入口设置遮阳棚能显著改善驾驶人的明暗适应能力<sup>[8]</sup>。隧道进出口的明暗适应问题是影响隧道行车安全的重要因素。为进一步提升隧道进出口的行车安全性,本文通过实车试验采集隧道进出口照度、车辆运行速度及驾驶人眼动参数,通过分析进出口照度变化确定眼动参数合理范围,探究车速、照度与瞳孔换算震荡时间的关系,结合瞳孔换算震荡的空间分布确定隧道进出口明暗适应时间,分析驾驶人明暗适应特性。

1 试验方案与数据处理

通过实车试验采集隧道进出口路段车辆运行速度、照度及驾驶人眼动参数。试验路段为福银(福州—银川)高速公路陕西境内蓝关收费站至葛牌收费站路段,高速公路限速为 120 km/h 和 100 km/h,隧道路段限速为 80 km/h 和 60 km/h,均为单向两车道,隧道的相关参数见表 1。试验人员共 13 人,驾龄大于 3 年且驾驶技术娴熟,矫正视力均达到 4.8 及以上。为避免眼镜引起眼动仪滑动导致试验误差,近视的被试者全程佩戴隐形眼镜。

表 1 隧道的相关参数

隧道名称	长度/m	是否有照明	隧道名称	长度/m	是否有照明
辋川 1 号隧道	610	是	白家坪 2 号隧道	180	是
辋川 2 号隧道	485	是	董家岩 1 号隧道	220	是
辋川 3 号隧道	260	是	董家岩 2 号隧道	60	否
山底村隧道	400	是	李家河 1 号隧道	900	是
白家坪 1 号隧道	600	是	李家河 2~3 号隧道	4 300	是

续表 1

隧道名称	长度/m	是否有照明	隧道名称	长度/m	是否有照明
黄沙沟隧道	305	是	周家院 3 号隧道	175	是
庙边子隧道	445	是	周家院 4 号隧道	180	是
草坪隧道	290	是	景家湾隧道	150	是
周家院 1 号隧道	80	否	铁索桥隧道	80	否
周家院 2 号隧道	280	是			

注:隧道长度为西安至蓝田方向长度。

1.1 隧道照明参数和眼动参数

选取照度作为隧道照明参数,选取瞳孔面积作为驾驶人眼动参数。

1.2 试验设备

试验车辆为宝沃 BX7(5 座 SUV);照度计采用华谊仪器 MS6612 数字照度计,其测量范围为 0~200 000 lx,测量准确度为±3%,采样速率为 2 次/s;眼动仪采用 SMI ETGTM 眼镜式眼动仪,其双眼采样频率为 120 Hz,追踪范围为 80°(水平)、46°(垂直),追踪分辨率为 0.1,注视定位精度为 0.5°。试验中通过手机拍摄记录照度计数据和车辆速度(速度表盘)。

1.3 试验方法

选取晴天进行试验,提前准备相关设备。在收费站附近停车,被试者佩戴眼动仪,启动设备并进行校准,开始数据记录,驾驶人驶入试验路段;告知被试者根据自己的驾驶习惯操作,操作中避免触碰眼动仪;在进入隧道洞口前方 500 m 处,副驾驶打开照度计,试验中手机始终保持视频录制状态;时刻关注与眼动仪配套的电脑连接是否稳定,一旦连接断开,寻找最近的服务区或紧急停车带停车调整,重新启动设备,补充单次试验;到达下一收费站视为单次试验结束,拆卸眼动仪并停止数据记录,更换被试者。

1.4 数据处理

试验完成后,采用 Begaze 软件导出瞳孔直径数据,并同步记录照度、运行速度、瞳孔直径的 3 组视频。将视频进行裁剪,从洞外距离隧道进口 10 s 处裁减至隧道出洞后 5 s,然后将 3 组视频组合成 1 个视频,实现同步播放。试验原始数据见表 2。

2 照度数据处理与分析

照度试验数据统计时特征断面划分方法:1) 进洞时,在距洞口一个停车视距处开始以 10 m 为梯度取至洞口处,进洞后以相同梯度取至照度基本稳

表 2 试验原始数据

时间/ (1/12 s)	左眼瞳孔 直径/mm	右眼瞳孔 直径/mm	照度/lx	速度/ (km·h <sup>-1</sup> )
8 296 162	1.76	1.78	40 900	68
8 312 769	1.80	1.82	40 900	68
8 329 477	1.82	1.90	40 900	68
8 346 033	1.82	1.84	40 900	68
8 362 754	1.78	1.84	40 900	68
8 379 368	1.80	1.88	40 900	68
8 395 946	1.80	1.88	40 900	68
8 412 676	1.84	1.92	40 900	68
8 429 307	1.84	1.92	40 900	68
8 445 924	1.82	1.92	40 900	68
8 462 513	1.84	1.96	40 900	68
8 479 230	1.88	1.96	40 900	68
8 495 818	1.88	1.98	40 900	68
8 512 486	1.90	1.96	40 900	68
8 529 102	1.98	1.96	40 900	68
8 545 812	1.98	1.98	40 900	68
8 562 462	1.98	1.98	40 900	68
8 579 026	1.98	1.98	40 900	68
8 595 714	1.98	1.98	40 900	68
8 612 375	2.00	1.96	40 000	68
8 628 991	2.00	1.96	40 000	68
8 645 559	1.98	1.96	40 000	68

定处;2) 出洞时,在距洞口 60 m 开始以 10 m 为梯度取至洞口处,出洞后以相同梯度取至照度基本稳定处。隧道划分依据见表 3,仅分析蓝田至西安方向不同类型隧道各一条的照度规律。

表 3 隧道划分依据

分类	长度/m	照明情况
短隧道	(0,100]	未设置照明
	(100,500]	设置照明
中隧道	(500,1 000]	设置照明
长隧道	(1 000,3 000]	设置照明

## 2.1 长隧道洞口附近照度分布规律分析

李家河3号隧道属于长隧道,其洞口附近照度分布见图1、图2。

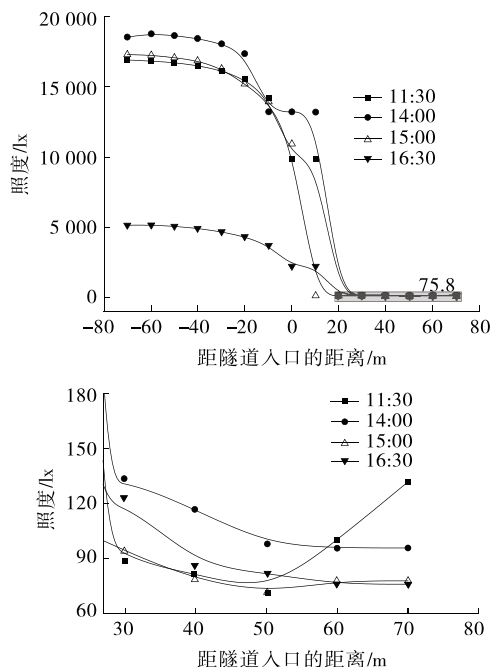


图1 长隧道入口附近照度分布

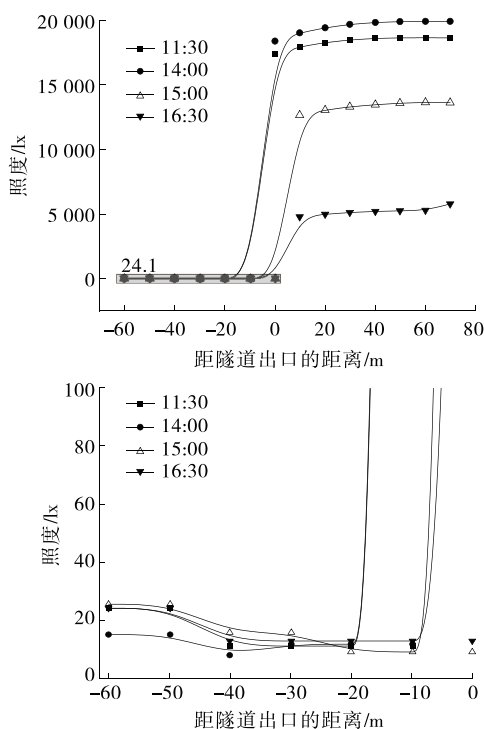


图2 长隧道出口附近照度分布

由图1、图2可知:1)长隧道入口附近照度存在两次明显下降,分布范围为距入口 $-20\sim 30$  m,且第二次变化幅度更大,其分布范围为距入口 $0\sim$

30 m;进洞后30 m,随隧道纵深增加,照度先降低,后趋于稳定。2)隧道出口附近照度变化与入口存在显著差异,仅存在一次明显的照度提升,分布范围为距隧道出口 $-10\sim 10$  m。3)从时间分布来看,14:00左右洞内外照度差最大,16:30以后洞内外照度差显著减小。

## 2.2 中隧道洞口附近照度分布规律分析

李家河1号隧道属于中隧道,其洞口附近照度分布见图3、图4。

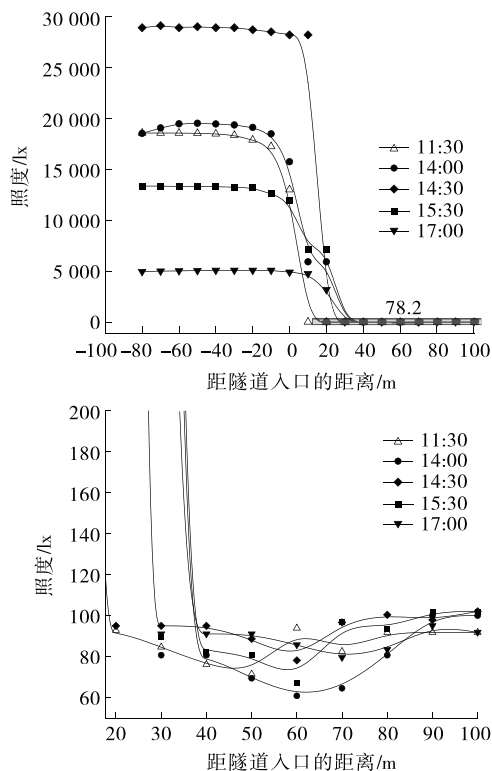


图3 中隧道入口附近照度分布

由图3、图4可知:1)中隧道入口附近照度存在两次明显下降,集中分布在距入口 $-10\sim 30$  m,除14:00时外,其他时刻均为第一次下降幅度更小,分布范围为距入口 $10\sim 30$  m;进洞后 $30\sim 40$  m,洞内亮度基本不受自然光影响,随隧道纵深增加,照度先降低后增加,整体变化幅度较小。2)隧道出口附近存在2次大幅度照度提升,出洞后20 m左右光环境达到外界稳定自然光强度。

## 2.3 短隧道洞口附近照度分布规律分析

### 2.3.1 未设置照明的短隧道

铁索桥隧道为未设置照明的短隧道,其洞口附近照度分布见图5。

由图5可知:1)未设置照明的短隧道入口附近

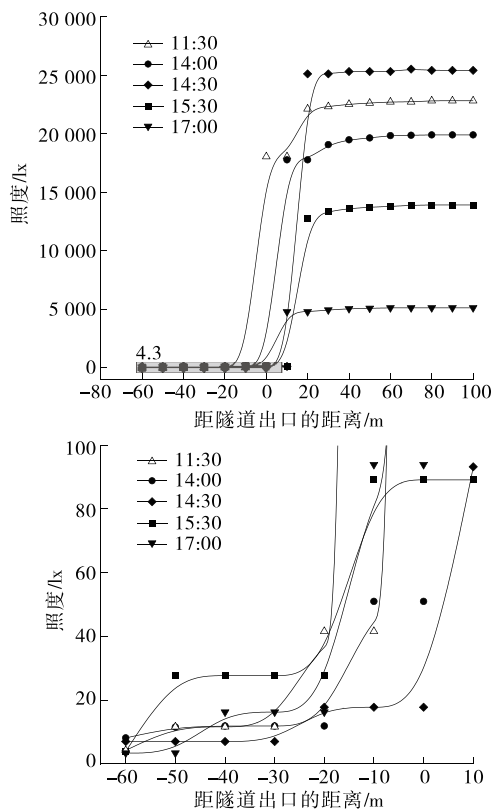
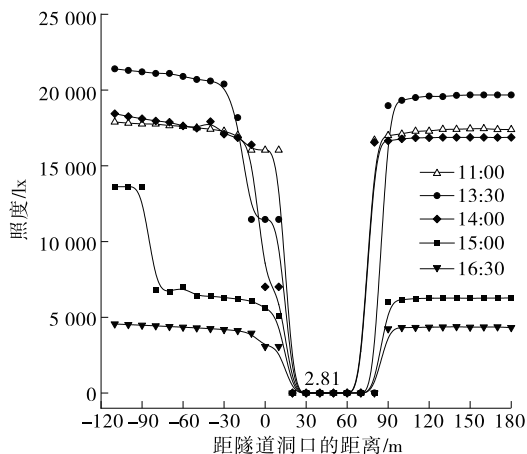


图4 中隧道出口附近照度分布



与洞口距离为零处为隧道进口,距洞口80 m处为隧道出口

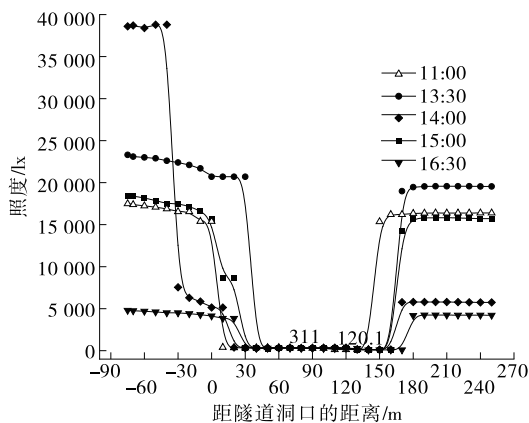
图5 未设置照明的短隧道洞口附近照度分布

照度发生两次大幅度下降,第二次下降发生在进洞后10~30 m,且下降幅度高于第一次;2) 洞内亮度为0~10 lx,与月光下的照度近似;3) 隧道出口附近照度变化与入口存在显著差异,仅存在一次明显的照度提升,出隧道后10 m由洞内较低亮度恢复至洞外亮度;4) 进洞前外界稳定光照强度略高于出洞后外界稳定光照强度。

### 2.3.2 设置照明的短隧道

景家湾隧道为设置照明的短隧道,其洞口附近

照度分布见图6。



与洞口距离为零处为隧道进口,距洞口150 m处为隧道出口

图6 设置照明的短隧道洞口附近照度分布

由图6可知:1) 设置照明的短隧道入口附近照度发生两次较明显的下降,第二次下降发生在进洞后10~30 m,且下降幅度普遍高于第一次;2) 洞内亮度远高于未设置照明的短隧道,为100~4 001 lx;3) 出口内外各10 m范围,由一次大幅度提升就实现了洞内较低亮度至洞外亮度的过渡。

综上,隧道进口光照强度普遍存在两次大幅度变化,而隧道出口普遍存在一次。进洞后0~30 m照度仍可能受洞外自然光的影响,距隧道出口-10~10 m照度会从洞内较低的亮度完成向洞外自然光的突变,而后洞外光照强度基本稳定。为明确洞内外光环境过渡集中范围,对其余所有隧道不同时刻洞外自然光到洞内人工光过渡区域进行统计,结果见图7。

由图7可知:自然光并非在隧道洞口瞬间消失,而是由于入射角度不同、隧道洞口朝向不同、洞外环境差异,在进洞后一定距离才会变为洞内稳定人工光源,主要集中在进洞后10~30 m;隧道出口光线转换的主要分布区域为洞内-10 m到洞外15 m。

## 3 基于瞳孔震荡的明暗适应时间界定

试验路段包括独立隧道与隧道群,根据照度分布规律,确定独立隧道眼动参数分析范围为距隧道洞口-50~50 m;对于隧道群,隧道群间距 $\geq$ 设计速度下6 s行程时,将隧道群划入单独隧道进行分析,间距不满足该要求时不计入统计范围,包括周家院隧道群(周家院1~4号隧道)、李家河隧道群(李家河2~3号隧道遮阳棚连接段)、铜川隧道群(铜川1~2号隧道)。

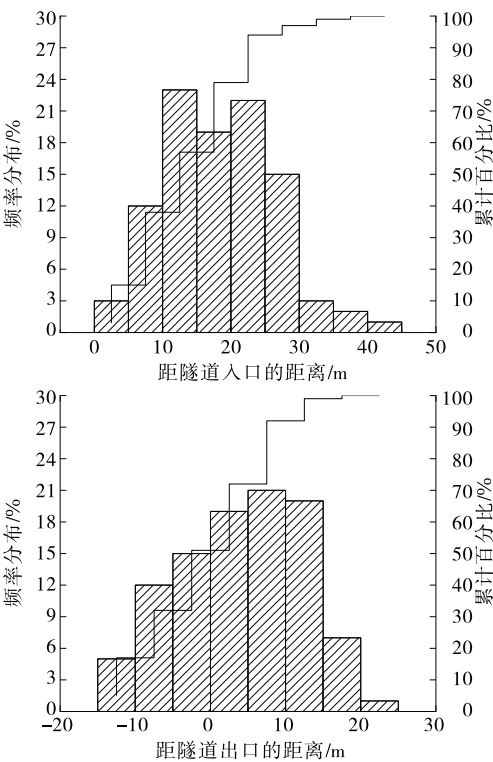


图 7 隧道洞口附近受自然光影响的范围分布

3.1 界定指标

以瞳孔震荡为界定指标分析隧道进出口范围明暗适应时间。瞳孔震荡定义及对应时间:1) 起始时间为瞳孔面积扩张到前一相邻时刻的 50% 及以上; 2) 结束时间为瞳孔面积缩小到前一相邻时刻的 50% 及以下。采用瞳孔瞬时震荡幅度  $\mu$  衡量视觉负荷强度[见式(1)],得到瞳孔换算震荡时间  $T$ [见式(2)]。

$$\mu = \int_{t_0}^{t_0+t_v} \frac{S(t) - S(t_1)}{\Delta S t_v} dt \tag{1}$$

$$T = f(\mu) t_v \tag{2}$$

式中: $t_0$ 为瞳孔瞬时震荡起点时间(s); $t_v$ 为瞳孔瞬时震荡时间(s); $S(t)$ 为 $t$ 时刻瞳孔面积( $\text{mm}^2$ ); $S(t_1)$ 为 $t_1$ 时刻瞳孔面积( $\text{mm}^2$ ); $t_1$ 为 $t_v$ 内瞳孔面积最小值对应的时间(s); $\Delta S$ 为瞳孔面积变化正常区域范围差值( $\text{mm}^2$ ),瞳孔直径正常变化区域为 2~5 mm,故  $\Delta S = 16.5 \text{ mm}^2$ ;  $f(\mu)$ 为瞳孔震荡幅度函数, $\mu \leq 1$  时  $f(\mu) = 1$ ,  $1.1 > \mu > 1$  时  $f(\mu) = \mu$ ,  $\mu \geq 1.1$  时  $f(\mu) = 1.1$ 。

文献[9]的研究表明,人眼无法感知小于 0.1 s 的视觉刺激,心理学常用最小刺激时间为 0.2 s。对于相邻瞬时瞳孔震荡时间差小于 0.1 s 的数据,视为一次瞬时瞳孔震荡发生。数据分析中发现对于长度

大于 500 m 的隧道存在两次震荡现象,即在出现一次时间大于 0.2 s 的瞬时震荡后又出现了第二次大于 0.2 s 的瞬时震荡,且震荡间隔时间小于 1 s,此时应分别计算单次强度得到换算时间,各自时间加上中间间隔时间为瞳孔换算震荡时间。表 4 为杜志刚等提出的基于视觉符合的行车舒适性评价标准<sup>[10]</sup>。

表 4 隧道洞口行车舒适性评价标准

视觉震荡累计 时间/s	驾驶人主 观感受	视觉震荡累计 时间/s	驾驶人主 观感受
$\leq 0.1$	舒适	(1.0,1.5]	重度不适
(0.1,0.2]	轻度不适	$> 1.5$	极其不适
(0.2,1.0]	不适		

瞳孔直径原始数据见图 8(瞳孔直径为零的数据视为采集误差)。左右眼瞳孔直径差的绝对值不大于 0.25 mm,分析中取左右眼瞳孔直径平均值。若左右眼中有一处的数据为零,且上一相邻时刻左右眼瞳孔直径差满足要求,则取不为零的数据作为该组数据。根据圆面积计算公式由瞳孔直径计算瞳孔面积。

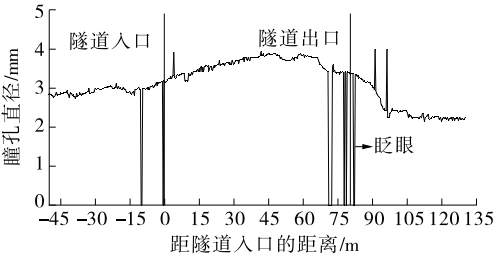


图 8 铁索桥隧道瞳孔直径原始数据

3.2 洞口明暗适应时间

根据式(1)、式(2)计算得到隧道洞口瞳孔换算震荡时间  $T$  的分布(见表 5),其中隧道进口和出口分别有 62.99%、57.48% 的样本存在震荡效应。

表 5 隧道洞口瞳孔换算震荡时间  $T$  的分布

$T/s$	隧道进口		隧道出口	
	样本 量/个	百分 比/%	样本 量/个	百分 比/%
$\leq 0.1$	29	31.52	52	59.09
(0.1,0.2]	7	7.61	5	5.68
(0.2,1.0]	42	45.65	27	30.68
(1.0~1.5]	11	11.96	3	3.41
$> 1.5$	3	3.26	1	1.14

根据表 5,存在瞳孔震荡的样本中,瞳孔换算震荡时间  $T$  集中分布在 0.2~1 s。比较隧道出入口的

$T$  值,隧道出口的行车舒适性优于隧道入口。表 6 为 13 名被试者的平均瞳孔换算震荡时间  $T_{\text{平均}}$ ,可以看出隧道入口的瞳孔换算震荡时间普遍比隧道出口长。

表 6 被试者的平均瞳孔换算震荡时间  $T_{\text{平均}}$

被试者 编号	$T_{\text{平均}}/s$		被试者 编号	$T_{\text{平均}}/s$	
	隧道入口	隧道出口		隧道入口	隧道出口
1	0.366	0.285	8	0.732	0.608
2	0.734	0.473	9	0.455	0.591
3	0.881	0.673	10	0.699	0.620
4	0.332	0.183	11	0.824	0.562
5	0.873	0.365	12	0.399	0.266
6	0.751	0.774	13	0.532	0.374
7	0.757	0.555			

试验中车辆速度为 50 ~ 102 km/h, 通过

表 7 隧道洞口瞳孔换算震荡起始点的空间分布

距隧道入口 的距离/m	进洞瞳孔换算震荡起始点的空间分布				距隧道出口 的距离/m	出洞瞳孔换算震荡起始点的空间分布			
	样本 量/个	百分比/ %	距入口距离的 85%分位值/m	距入口距离的 15%分位值/m		样本 量/个	百分比/ %	距出口距离的 85%分位值/m	距出口距离的 15%分位值/m
(-50, -40]	0	0.00			(-50, -40]	1	2.86		
(-40, -30]	2	3.08			(-40, -30]	0	0.00		
(-30, -20]	3	4.62			(-30, -20]	4	11.43		
(-20, -10]	11	16.92			(-20, -10]	3	8.57		
(-10, 0]	10	15.38	23	-17	(-10, 0]	8	22.86	15	-20
(0, 10]	19	29.23			(0, 10]	11	31.43		
(10, 20]	9	13.85			(10, 20]	4	11.43		
(20, 30]	7	10.77			(20, 30]	2	5.71		
(30, 40]	4	6.15			(30, 40]	1	2.86		
(40, 50]	0	0.00			(40, 50]	1	2.86		

表 8 隧道洞口明暗适应时间建议值

位置	隧道限速/ (km · h <sup>-1</sup> )	隧道设计速度/ (km · h <sup>-1</sup> )	明暗适应时 间统计值/s	明暗适应时 间建议值/s
隧道	60	80/100	2.561	2.6
入口	80	80/100/120	2.099	2.1
隧道	60	80/100	1.789	1.8
出口	80	80/100/120	1.573	1.6

## 4 结语

本文通过实车试验采集驾驶人瞳孔直径、照度、车速数据,通过分析隧道洞口附近照度变化规律确定瞳孔面积合理分析范围,并采用数理统计方法得到瞳孔换算震荡时间分布特性和空间分布规律,据此确定隧道进出口明暗适应时间为 1.6 ~ 2.6 s。该

Spearman 相关性分析,在隧道入口,瞳孔换算震荡时间  $T$  与速度呈中等强度负相关,而在隧道出口未表现出相关性。以  $T$  的 85%分位值( $T_{85}$ )作为视觉不适临界值,隧道进口限速 60 km/h 时,取被试者在 50 ~ 70 km/h 时的  $T_{85}$ (1.181 s);隧道进口限速为 80 km/h 时,取被试者在 70 ~ 102 km/h 时的  $T_{85}$ (1.064 s);由于出口  $T$  与速度未表现出显著相关性,直接取隧道出口处的  $T_{85}$ (0.898 s)。进一步统计分析发生轻微及以上不适时瞳孔换算震荡发生的位置,得到对应空间分布(见表 7)。

根据表 7,取 85%分位数据作为发生位置的临界值。假定车辆从洞口行驶至该位置以限速匀速行驶,结合视觉不适临界值,得到隧道洞口明暗适应时间建议值(见表 8)。

研究结果对隧道进出口线形设计具有一定参考意义。未来可以采集不同年龄段驾驶人和不同车型下瞳孔直径、照度、车速数据,对该研究结果进行进一步论证。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通运输部.2020 年交通运输行业发展统计公报[EB/OL].[2021-05-19].[http://big5.www.gov.cn/gate/big5/www.gov.cn/xinwen/2021-05/19/content\\_5608523.htm](http://big5.www.gov.cn/gate/big5/www.gov.cn/xinwen/2021-05/19/content_5608523.htm).
- [2] 申艳军,杨阳,邹晓龙,等.国内公路隧道运营期交通事故统计及伤亡状况评价[J].隧道建设(中英文),2018,38(4):564-574.
- [3] 赖金星,张鹏,周慧,等.高速公路隧道交通事故规律研究[J].隧道建设,2017,37(1):37-42.

(下转第 44 页)

表 12 西绵高速公路交通安全设施

现场抽查结果		单位:处	
缺陷名称	抽查结果	缺陷名称	抽查结果
护栏缺损	0	标志缺失、损坏	0
护栏防护等级不足	0	标线缺损	0
护栏外展设置不规范	9	标线施划错误	1
护栏过渡段设置不规范	2	防落网缺损	0
护栏立柱加密不规范	0	防眩设置缺损	0
隔离栅缺损	0	绿化管护不善	0
标志污染、遮挡	1		

注:所有缺陷的严重程度均为一般;标线施划错误 1 处,长度 30 m。

表 13 西绵高速公路实体检测结果

检测项目	合格率/%
护栏厚度	98.00
护栏中心高度	100.00
立柱埋置深度	100.00
左侧虚线	56.90
右侧实线	96.86
路段平均	76.88

采用上述基于德尔菲法优化的高速公路交通安全设施技术状况评定方法对该路段安全设施进行评定, $I_{TCI}=88.3$ ,对照表 1,该路段交通安全设施的技术状况综合评定为“良”。

#### 4 结语

高速公路交通安全设施的技术状况评定受人为因素影响较大。本文在 JTG 5210—2018《公路技术

状况评定标准》要求的基础上,采用德尔菲法,通过专家调查进一步优化高速公路交通安全设施评定标准和方法,将交通安全评定划分为现场抽查和实体检测两部分,并结合实际赋予不同权重,对高速公路交通安全设施的技术状况进行评定,评定结果可为高速公路养护决策提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 北京深华达交通工程检测有限公司.公路护栏安全性能评价标准:JTG B05—01—2013[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2013.
- [2] 交通运输部公路科学研究院.公路交通安全设施设计规范:JTG D81—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [3] 交通运输部公路科学研究院.公路技术状况评定标准:JTG 5210—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [4] 董旭明.公路交通安全设施技术状况评定体系研究[J].山西建筑,2014,40(11):139—141.
- [5] 孙鹏.高速公路交通安全设施评价方法探究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2022(8):209—211.
- [6] 龙小强,谭云龙.基于模糊综合评价的城市道路交通拥堵评价研究[J].交通标准化,2011,39(11):114—117.
- [7] 付俊俊.基于德尔菲法的轨道交通桥梁关键检测指标研究[J].公路与汽运,2022(1):147—150.
- [8] 张国立,张辉,孔倩.模糊数学基础及应用[M].北京:化学工业出版社,2011.
- [9] 寇震,旷远许.基于模糊综合评价方法的中国道路交通安全评价研究[J].交通标准化,2013,41(11):81—83.

收稿日期:2022—09—01

\*\*\*\*\*

(上接第 40 页)

- [4] LEITAO S, SOLTEIRO PIRES E J, DE MOURA OLIVEIRA P B. Road tunnels lighting using genetic algorithms[C]//2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems. IEEE, 2009:1—6.
- [5] 叶飞,龚波.基于瞳孔变动的隧道群区段视觉明暗适应特性研究[J].公路与汽运,2018(2):40—44.
- [6] 李俊德,冉涛,廖疆平,等.基于瞳孔直径变化的隧道明暗适应距离分析[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(8):197—200.

- [7] 王健,潘福全,王铮,等.基于明暗适应的隧道出入口照明改善方法[J].交通工程,2019,19(6):19—22.
- [8] 赵郁.公路隧道出入口遮阳棚对驾驶人明暗适应能力的影响[J].中国公路,2022(6):114—115.
- [9] 孟庆茂,常建华.实验心理学[M].北京:北京师范大学出版社,1999.
- [10] 杜志刚,潘晓东,郭雪斌.公路隧道进出口行车安全评价指标应用研究[J].同济大学学报(自然科学版),2008,36(3):325—329.

收稿日期:2022—07—29