

## 高隧道比路段隧道出入口驾驶员视觉负荷研究

段萌萌<sup>1a</sup>,唐伯明<sup>\*1a</sup>,胡旭辉<sup>2</sup>,何柏科<sup>3</sup>,刘唐志<sup>1b</sup>

(1. 重庆交通大学 a. 土木工程学院, b. 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 重庆高速集团有限公司, 重庆 400074;  
3. 重庆高速工程顾问有限公司, 重庆 400074)

**摘要:** 为分析高隧道比路段驾驶员视觉特性变化规律与行车安全关系,本文首先分析了隧道出入口段驾驶员的瞳孔面积变化规律,并提出“负荷重复累积效应”概念表达频繁进出隧道过程中驾驶员视觉变化现象.采用瞳孔面积最大瞬态速度 $V_p(t)$ 作为评价指标描述驾驶员在隧道出入口的视觉负荷变化规律,以瞳孔面积最大瞬态速度值MTPA及换算视觉震荡持续时间作为评判视觉负荷大小的依据.建立了隧道出入口驾驶员视觉舒适度评价体系,然后依据此评价指标体系确定隧道出入口的驾驶员视觉负荷程度,最终判断隧道出入口对行车安全的影响程度.研究表明,本文的研究方法是可行的,可以很好地应用于高隧道比路段驾驶员视觉负荷评价研究中,可为隧道出入口安全保障提供一定的参考.

**关键词:** 交通工程;高隧道比路段;隧道出入口;视觉负荷;黑洞效应;白洞效应;瞳孔面积

## Driver's Visual Load at Tunnel Entrance and Exit of Sections with High Ratio of Tunnels

DUAN Meng-meng<sup>1a</sup>, TANG Bo-ming<sup>1a</sup>, HU Xu-hui<sup>2</sup>, HE Bai-ke<sup>3</sup>, LIU Tang-zhi<sup>1b</sup>

(1a. School of Civil Engineering & Architecture, 1b. School of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing Hi-speed Group Co. Ltd., Chongqing 400074, China;  
3. Chongqing Expressway Engineering Consultant Co. Ltd., Chongqing 400074, China)

**Abstract:** In order to analyze the relationship between the change of driver's visual characteristics and the safety of driving in sections with high ratio of tunnel, the change regulation of pupil area of the driver while going through the tunnel entrance and exit is analyzed. And the concept of "load repeat accumulation effect" is put forward to express the phenomenon of driver's visual change in the process of frequently entering and exiting the tunnels. The maximum transient velocity of pupil area  $V_p(t)$  is taken as an evaluation index to describe the change regulation of driver's visual load. The maximum transient velocity value of pupil area which is short for MTPA and the conversion duration for visual turbulence are taken as the basis for judging the size of visual load of the driver's. The evaluation system of drivers' visual comfort at the entrance and exit of tunnels is established, then confirm the visual load according to the evaluation system. Finally, the influence degree of the tunnel entrance and exit on the traffic safety could be determined. The research results show that the research method of this paper is feasible. It could be well applied to the study of visual load evaluation of drivers in sections with high ratio of tunnels, it could also provide a certain reference for the safety guarantee of tunnel entrance and exit.

**Keywords:** traffic engineering; high tunnel ratio section; entrance and exit of tunnel; visual load; "black hole" effect; "white hole" effect; pupil area

收稿日期:2018-01-22

修回日期:2018-03-15

录用日期:2018-03-26

基金项目:重庆市科技计划项目/Chongqing Municipal Science and Technology Commission(cstc2017shms-zdyfX0070, 2011660089);重庆市交通科技项目/Chongqing Traffic Science and Technology Project(SW-2016-263).

作者简介:段萌萌(1989-),女,黑龙江人,博士生.

\*通信作者:393451865@qq.com

## 0 引言

随着我国高速公路建设向中西部地区的发展,使得高速公路出现大量的隧道,构成了典型的高隧道比路段。隧道路段不同于开放路段,其行车环境特殊,最典型的的就是隧道出入口存在“黑洞白洞”效应,给驾驶员视觉造成了过度的负荷,导致操作失控,使得隧道出入口成为高隧道比路段的事故多发位置。因此,对隧道进出口处驾驶员视觉变化规律进行研究,并揭示负荷变化机理,具有重要意义。

我国对隧道路段驾驶员视觉特性的研究较多,如阎莹<sup>[1]</sup>以隧道群为研究对象,对驾驶人的瞳孔变化进行了试验研究。叶飞<sup>[2]</sup>将瞳孔面积作为驾驶人视觉明暗适应表征参数,分析了典型隧道群路段的驾驶人瞳孔面积变化规律。赵炜华等<sup>[3]</sup>对特长隧道入口过程中,驾驶员的注视时间、扫视幅度规律进行了研究。王少博<sup>[4]</sup>建立了长隧道亮度与驾驶员瞳孔面积的变化关系。文献[5-9]针对隧道出入口段驾驶员的视觉负荷进行了研究,引用车辆桥头瞬时跳车对人员产生的振动原理,提出以瞳孔面积瞬态最大速度MTPA进行隧道出入口视觉负荷评价指标,并得出与实际相符合的结论。

但上述研究均未对高隧道比路段环境对驾驶员视觉负荷进行机理研究。所以,本文将对高隧道比路段驾驶员视觉特性变化规律进行分析,为高隧道比路段的安全保障提供一定的理论指导。

## 1 试验

### 1.1 试验路段

本文以渝湘高速白马—羊角—大湾—黄草岭—武隆5座隧道构成的高隧道比路段作为研究对象,分析驾驶员在通过该路段时的视觉特性,对路段环境的行车舒适性及行车安全性进行评价。隧道情况及相互间距情况如表1所示。

可以看出,路段隧道总长度达到25 228 m,路段总长27 755 m,本文定义隧道比=(隧道里程/路段总里程)×100%,则该实验路段的隧道比达到91%,为典型的高隧道比路段。有必要对此种高隧道比路段的驾驶员视觉特性机理进行分析,提出针对性的安全保障措施。

表1 隧道情况

Table 1 Condition of tunnel of sections

隧道名称	桩号	长度/m	类型
白马隧道	K1701+710~K1704+825	3 115	特长隧道
连接段	K1704+825~K1705+394	569	
羊角隧道	K1705+394~K1712+070	6 676	特长隧道
连接段	K1712+070~K1712+267	197	
大湾隧道	K1712+267~K1715+087	2 820	长隧道
连接段	K1715+087~K1716+388	1 301	
黄草岭隧道	K1716+388~K1719+607	3 219	特长隧道
连接段	K1719+607~K1720+067	460	
武隆隧道	K1720+067~K1729+465	9 398	特长隧道

### 1.2 试验设计

#### (1) 试验车辆.

本文的试验车辆为1辆丰田5座小轿车。

#### (2) 试验仪器.

本实验采用的仪器为Smarteye眼动仪。

#### (3) 试验天气.

本实验天气为晴天,光线较弱。

#### (4) 试验时间.

本实验进行时间为非节假日,路段交通量较少。试验时段为8:00-16:00。

#### (5) 试验人员.

选择6名驾龄5年以上的驾驶员,其中年龄30~40岁的3名,40~50岁的3名。

### 1.3 试验数据采集

试验过程中,每位驾驶员轮流在试验路段上行驶1次,使用眼动仪采集每位驾驶员的瞳孔直径数据、时间数据,以及数据与隧道对应的位置关系,并计算得到对应位置处瞳孔直径 $d_i$ 的加权平均值,即

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + d_5 + d_6}{6} \quad (1)$$

式中: $\bar{d}$ 为6名驾驶员的瞳孔指标数据算数平均值; $n$ 为驾驶员数量, $n=6$ 。

## 2 高隧道比路段驾驶员瞳孔面积变化特性分析

### 2.1 瞳孔面积指标

由于隧道环境的特殊性,瞳孔大小在隧道不同位置会发生剧烈变化,影响行车安全性。本文以

瞳孔面积 $S$ 及隧道入口前后位置为指标,建立对应的关系,分析这种规律特性.瞳孔面积 $S$ 表达式为

$$S = \frac{1}{4}\pi d^2 \quad (2)$$

### 2.2 隧道入口驾驶员瞳孔面积变化规律

对本文5个隧道入口前后200 m范围内的驾驶员瞳孔面积 $S$ 变化规律进行了分析,结果如图1所示.

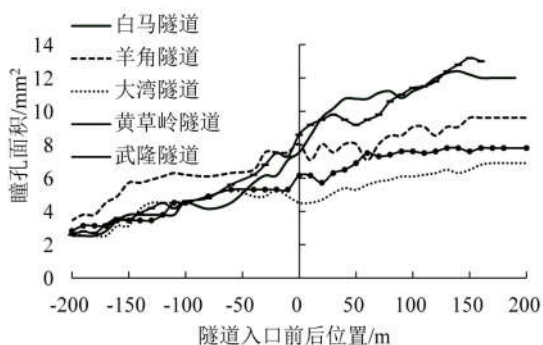


图1 隧道入口驾驶员瞳孔面积变化规律  
Fig. 1 The change regulation of pupil area of tunnel entrance

从图1可以看出,在进入隧道前的开放路段,驾驶员瞳孔面积基本处于3.5~4.0 mm<sup>2</sup>之间.在进入隧道时,驾驶员瞳孔面积会发生显著的增大趋势,这主要是由于在外部路段亮度较高,驾驶员的瞳孔面积较小;隧道内亮度较低,驾驶员需要将瞳孔放大以适应低亮度环境.证明了隧道入口处存在“黑洞效应”现象.每个隧道的变化情况不同,主要是由于隧道内亮度本身不同导致.

### 2.3 隧道出口驾驶员瞳孔面积变化规律

对5个隧道出口前后200 m范围内驾驶员瞳孔面积变化规律进行了分析,结果如图2所示.

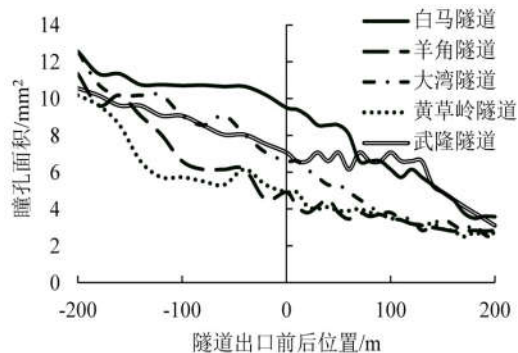


图2 隧道出口驾驶员瞳孔面积变化规律  
Fig. 2 The change regulation of pupil area of tunnel exit

从图2可以看出,出隧道时驾驶员视觉均表现出瞳孔面积迅速减小的规律,这是由于隧道内亮度低,驾驶员瞳孔处于较大状态;隧道外亮度高,出隧道瞳孔要迅速缩小.也证明了出隧道时存在“白洞效应”,对行车安全不利.每个隧道的变化情况不同,主要是由于隧道内亮度本身不同及出隧道外的亮度水平不同导致.

### 2.4 高隧道比路段视觉负荷重复累积效应

在高隧道比路段,驾驶员短时间内连续进出隧道,视觉上经历多次“黑洞、白洞”现象,形成视觉负荷重复累积的效应.图3展示了驾驶员在5个隧道入口、出口、内部(隧道内部驾驶员瞳孔面积取平均值代表)、外部的瞳孔面积水平及变化规律.

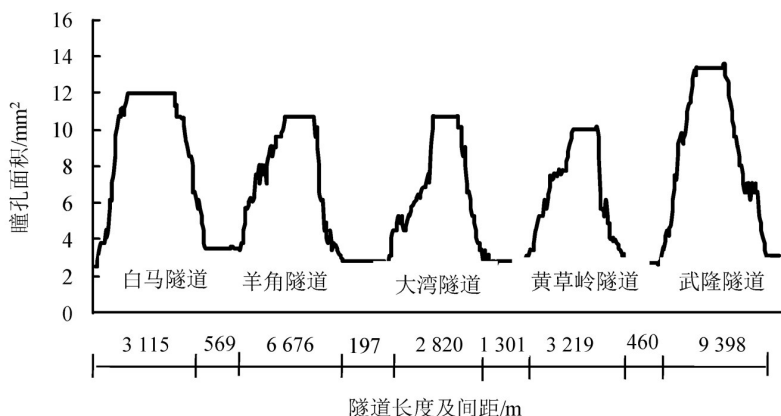


图3 高隧道比路段视觉负荷重复累积效应  
Fig. 3 Repeated accumulation effect of visual load of section with high ratio of tunnels

从图3可以看出,在高隧道比路段,隧道外及隧道内驾驶员瞳孔面积处于较为平稳的水平.在隧道外,驾驶员瞳孔面积均较小,在 $4\text{ mm}^2$ 左右,这是由于试验时间为白天,外部亮度较高;而在隧道内,瞳孔面积值均处于较高的水平,在 $10\text{ mm}^2$ 以上,这是由于隧道内亮度水平较低.不同的隧道,亮度水平有差异,导致每个隧道内驾驶员瞳孔面积水平不同.而在隧道出、入口,瞳孔面积在短时间内发生剧烈变化,经历多个隧道过程中,对驾驶员行车操作将产生更严重的影响,对行车安全极为不利.

### 3 高隧道比路段驾驶员视觉负荷评价方法

#### 3.1 评价方法

##### 3.1.1 瞳孔面积最大瞬态速度值

相关研究表明,瞳孔面积的急剧变化会导致驾驶员产生短暂的盲感,视觉负荷极大易导致驾驶员操作失误,发生事故.为了描述这种瞳孔面积变化剧烈程度,本文采用驾驶员瞳孔面积最大瞬态速度描述这种规律.

瞬时瞳孔面积频率加权速度表达式为

$$V_{\omega}(t_0) = \left[ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} V_{\omega}^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: $V_{\omega}(t_0)$ 为瞬时瞳孔面积频率加权速度幅值; $\tau$ 为持续平均积分时间; $t$ 为时间; $t_0$ 为考察瞬时时间.一般认为,当 $\tau$ 很小时,即表示瞬态振动或瞬态冲击情况,本文代表瞳孔瞬态变化.

将MTPA定义为瞳孔面积最大瞬态速度值( $\text{mm}^2/\text{s}$ ),简称MTPA((Maximum Transient Velocity Value of Pupil Area)<sup>[5]</sup>.表达式为

$$\text{MTPA} = \max \{V_{\omega}(t_0)\} \quad (4)$$

当测定隧道进出口的MPTA值时,建议 $\tau$ 取值1 s,结果可用于评价驾驶员在隧道进出口路段的视觉负荷.

##### 3.1.2 换算视觉震荡持续时间 $t_c$

相关研究表明,MTPA指标与换算视觉震荡持续时间 $t_c$ 具有一定的对应关系,在研究领域内两者可以作为对应指标相互验证.所以,为了使MTPA指标在视觉负荷评价研究方面的应用具有通用

性,本文采用对应的“换算视觉震荡持续时间 $t_c$ ”作为约束条件.

视觉震荡持续时间以某一时刻瞳孔面积比前一时刻增大50%以上为视觉震荡起始点,以某一时刻瞳孔面积比前一时刻小50%以上为视觉震荡结束点.则视觉震荡起始点至结束点之间的时间称为视觉震荡持续时间.由于视觉震荡持续时间较短,为使用该指标量化驾驶员视觉心理、生理负荷,将该指标乘以换算系数,得到换算视觉震荡持续时间<sup>[7]</sup>.

$$\mu = \int_{t_0}^{t_0+t_c} \frac{S(t)dt}{S_1 t_c} \quad (5)$$

$$t_c = \mu t_c \quad (6)$$

式中: $\mu$ 为视觉震荡时间换算系数; $t_c$ 为换算视觉震荡持续时间; $t_c$ 为视觉震荡持续时间; $t_0$ 为视觉震荡开始时间; $S(t)$ 为 $t$ 时刻瞳孔面积; $S_1$ 为瞳孔最大面积.

相关研究表明,当视觉刺激时间小于0.1 s时,不会引起驾驶员的不良视知觉<sup>[8]</sup>;而0.2 s为心理学试验中常用的最小视觉刺激时间<sup>[11]</sup>.

#### 3.2 评价指标体系

综上所述,以瞳孔面积最大瞬态速度值及换算视觉震荡持续时间两个指标建立高隧道比路段视觉舒适度评价指标体系如表2所示.

表2 视觉舒适度评价指标体系  
Table 2 Evaluation system of visual comfort

MTPA/( $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )		$t_c/\text{s}$	视觉负荷评价结果
隧道进口	隧道出口		
<20	<30	≤0.1	没有不舒适
[20,30)	[30,40)	(0.1,0.2]	稍不舒适
[30,70)	[40,85)	(0.2,1.0]	不舒适
[70,105)	[85,105)	(1.0,1.5]	很不舒适
≥105	≥105	>1.5	极不舒适

#### 3.3 试验分析

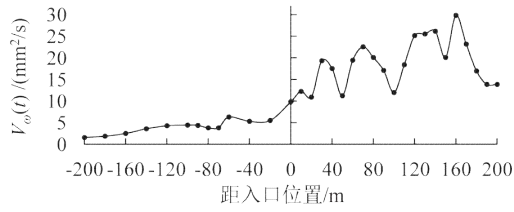
对本文实验的5个隧道分别求取各隧道入口前后、出口前后200 m行程范围内的驾驶员瞬时瞳孔面积频率加权速度 $V_{\omega}(t)$ 值,结果如下所示.

##### 3.3.1 隧道入口 $V_{\omega}(t)$ 变化规律分析

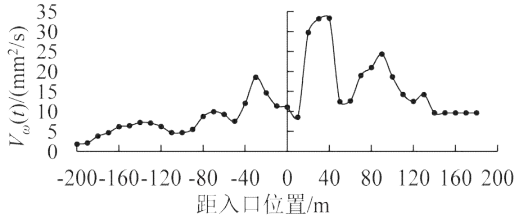
###### (1) 试验结果.

隧道入口前后 $V_{\omega}(t)$ 的变化规律如图4所示.

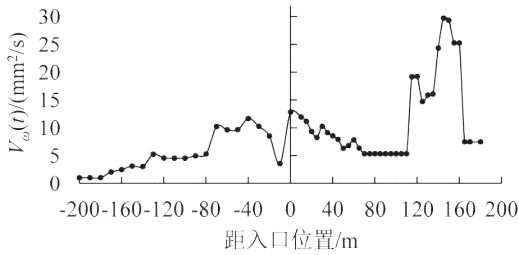




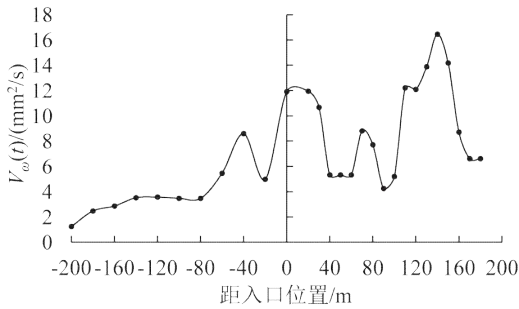
(a) 白马隧道入口



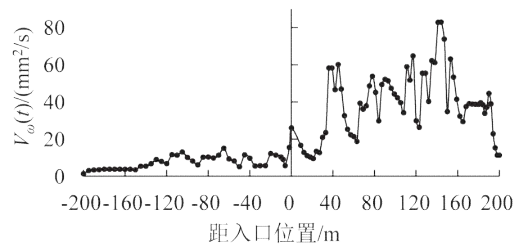
(b) 羊角隧道入口



(c) 大湾隧道入口



(d) 黄草岭隧道入口



(e) 武隆隧道入口

图4 隧道入口 $V_{\omega}(t)$ 变化规律

Fig. 4 The change regulation of  $V_{\omega}(t)$  of tunnel entrance

(2) 结果分析.

隧道入口前后 $V_{\omega}(t)$ 的统计结果如表3所示.

表3 隧道入口 $V_{\omega}(t)$ 结果统计

Table 3 Statistics results of  $V_{\omega}(t)$  of tunnel entrance

隧道名称	平均 $V_{\omega}(t)$ / (mm <sup>2</sup> /s)	MTPA 值 / (mm <sup>2</sup> /s)	$t_c$ / s	评价结果
白马隧道	13.10	30.00	0.14	稍不舒适
羊角隧道	11.74	33.30	0.18	稍不舒适
大湾隧道	9.23	29.31	0.07	没有不舒适
黄草岭隧道	7.35	16.45	0.08	没有不舒适
武隆隧道	26.96	82.91	0.83	不舒适

可以看出,本文分析的5个隧道中,MTPA值与换算视觉震荡持续时间 $t_c$ 结果一致,进洞时武隆隧道给驾驶员不舒适的感觉,羊角隧道、白马隧道稍不舒适,大湾隧道、黄草岭隧道没有不舒适的感觉.也表明高隧道比路段会给驾驶员视觉上造成连续重复的负荷效应,对行车安全极为不利.

结合实际情况可知,隧道内外亮度差异程度给驾驶员视觉造成不适,根据试验现场调查情况得到:5个隧道入口处隧道洞内灯具布设情况基本相同且灯光亮度差距较小;而由于5个隧道入口处洞外端墙颜色、材质及植被覆盖情况差距较大,反光性差异明显,导致隧道入口处内外亮度差异较大.具体表现为:武隆隧道入口端墙面积大、颜色浅、且无植被覆盖,反光性最强;羊角隧道入口端墙面积较小、颜色较浅、植被较少,反光性较强;白马隧道入口端墙面积较大、颜色较浅、但植被较多,反光性弱于前者;而大湾隧道、黄草岭隧道入口端墙颜色较深且植被覆盖多,反光性弱.因此,5个隧道入口处驾驶员的视觉舒适性程度具有较大差异.

3.3.2 隧道出口 $V_{\omega}(t)$ 变化规律分析

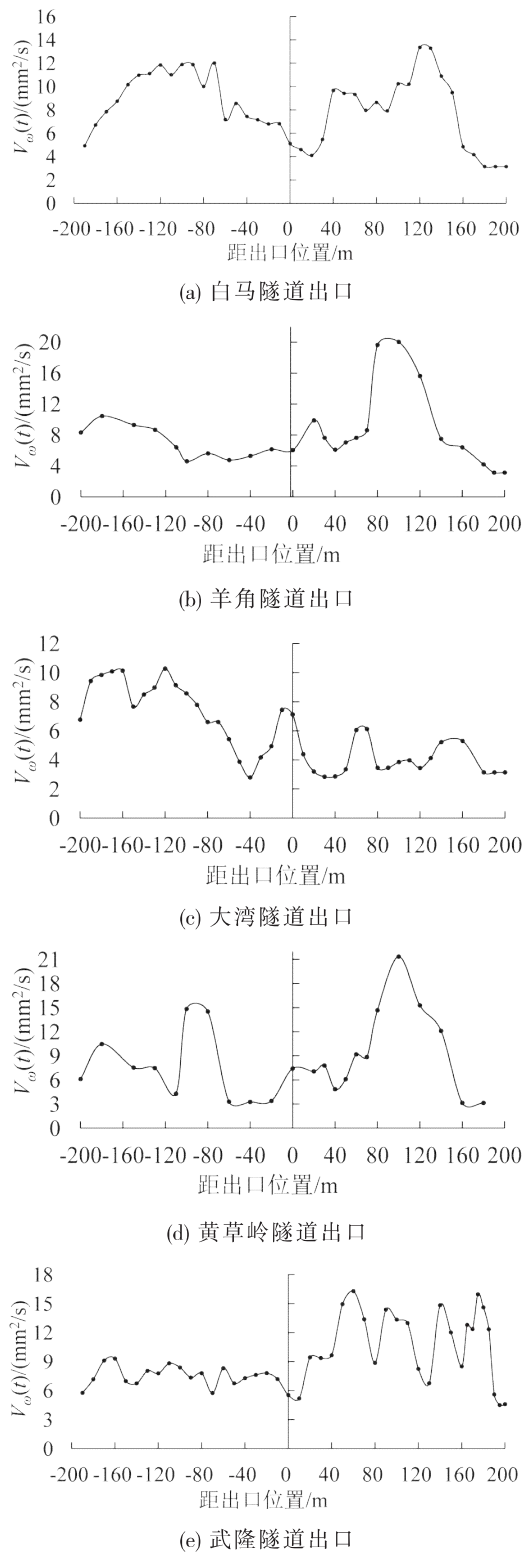
(1) 试验结果.

隧道出口前后 $V_{\omega}(t)$ 的变化规律如图5所示.

(2) 结果分析.

隧道出口前后 $V_{\omega}(t)$ 的统计结果如表4所示.

从表4可以看出,本文分析的5个隧道在出洞时驾驶员都没有感觉到视觉上的不舒适.这主要是由于人的视觉由暗到明的适应性较强.

图5 隧道出口 $V_{\omega}(t)$ 变化规律Fig. 5 The change regulation of  $V_{\omega}(t)$  of tunnel exit表4 隧道出口 $V_{\omega}(t)$ 统计结果Table 4 Statistics of  $V_{\omega}(t)$  results of tunnel exit

隧道名称	平均 $V_{\omega}(t)$ / ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	MTPA值/ ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	$t_c/\text{s}$	评价结果
白马隧道	8.49	13.35	0.05	没有不舒适
羊角隧道	8.09	20.20	0.08	没有不舒适
大湾隧道	5.82	10.27	0.04	没有不舒适
黄草岭隧道	8.52	21.34	0.08	没有不舒适
武隆隧道	9.33	16.29	0.06	没有不舒适

在高隧道比路段,驾驶员经历连续的“黑洞”、“白洞”效应,给驾驶员造成的视觉负荷强烈,对行车安全不利.根据上述研究结果,建议高速公路运营安全管理部门对高隧道比路段加强安全防控,应主要加强隧道入口亮度.

#### 4 结论

本文分析了高隧道比路段驾驶员频繁进出隧道过程中的视觉变化规律,得到以下结论:

(1) 在高隧道比路段,驾驶员短时间内连续进出隧道,视觉上经历多次“黑洞”、“白洞”现象,形成视觉负荷重复累积效应,严重影响行车操作,对行车安全极为不利.

(2) 采用瞳孔面积最大瞬态速度 $V_{\omega}(t)$ 作为评价指标描述驾驶员在隧道出入口的视觉负荷变化规律.研究表明,该方法应用于高隧道比路段驾驶员视觉负荷评价是可行的,具有一定的研究价值.

(3) 以瞳孔面积最大瞬态速度值MTPA及换算视觉震荡持续时间作为评判隧道出入口段驾驶员视觉负荷大小的依据,根据建立的隧道出入口驾驶员视觉舒适度评价体系,可判断隧道出入口的驾驶员视觉危险度,为相关部门管理隧道出入口路段行车安全提供一定的理论指导.

(4) 隧道入口给驾驶员视觉造成的不舒适感强于隧道出口,即“黑洞效应”比“白洞效应”行车危险性高.

#### 参考文献:

- [1] 阎莹,叶飞,王晓飞,等.隧道群路段环境光照明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(12):89-96. [YAN Y, YE F, WANG X F, et al.

- Analysis of environmental light intensity and driver's pupil area in tunnel section[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2016 (12): 89-96.]
- [2] 叶飞. 高速公路隧道群路段驾驶人视觉明暗适应变化规律研究[D]. 西安: 长安大学, 2014. [YE F. Study on the change law of driver's visual and light adaptation in highway tunnel section[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. ]
- [3] 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. [ZHAO W H, LIU H X, LIU W, et al. Driver's visual characteristics of freeway tunnel group[J]. Traffic Science and Engineering, 2011, 27(3): 75-81.]
- [4] 王少博. 高速公路隧道入口段驾驶人视觉特征研究[J]. 汽车实用技术, 2016(9): 108-113. [WANG S B. Study on driver's visual characteristics at the entrance of freeway tunnel[J]. Automotive Practical Technology, 2016 (9): 108-113.]
- [5] 潘晓东, 宋永朝, 杨轸, 等. 基于视觉负荷的公路隧道进出口环境改善范围[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(6): 777-780. [PAN X D, SONG Y Z, YANG Z, et al. Environmental improvement scope of highway tunnel entrance and exit based on visual load[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2009, 37 (6): 77-780.]
- [6] 郭雪斌, 崔显忠, 杜志刚. 公路隧道进出口视觉负荷评价方法及应用[J]. 公路, 2008(10): 258-261. [GUO X B, CUI X Z, DU Z G. Visual load evaluation method and application of highway tunnel entrance and exit[J]. Highway, 2008(10): 258-261.]
- [7] 杜志刚, 潘晓东, 杨轸, 等. 高速公路隧道进出口视觉震荡与行车安全研究[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 101-105. [DU Z G, PAN X D, YANG Z, et al. Research of visual turbulence and driving safety during freeway tunnel's entrance and exit[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5): 101-105.]
- [8] 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. [DU Z G, PAN X D, GUO X B. Evaluation index's application studies on driving safety at highway tunnel's entrance and exit[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2008, 36(3): 325-329.]
- [9] 杜志刚, 潘晓东, 郭雪斌. 高速公路隧道进出口视觉适应试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报(自然科学版), 2007, 39(12): 1998-2001. [DU Z G, PAN X D, GUO X B. Experimental studies of visual adaptation during freeway tunnels entrance and exit[J]. Journal of Harbin Institute of Technology(Natural Science Edition), 2007, 39(12): 1998-2001.]
- [10] 孟庆茂, 常建华. 试验心理学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2004. [MENG Q M, CHANG J H. Experimental psychology[M]. Beijing: Beijing Normal University Press, 2004.]
- [11] ZWAHLEN H T, BADURDEEN F F. Daytime legibility as a function of non-fluorescent and fluorescent traffic sign colors[C]//TRB. Transportation Research Record 1692. Washington DC: TRB, 2002: 13-17.