

基于瞳孔变动的隧道群区段视觉明暗适应特性研究*

叶飞^{1,2}, 龚波³

(1.浙江交通职业技术学院, 浙江 杭州 311112; 2.浙江省交通科学研究院, 浙江 杭州 310006;

3.长安大学汽车学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 为了从驾驶人视觉明暗适应角度改善高速公路隧道群区段环境光照度, 提高行车安全性, 在分析隧道群光环境特征、交通事故特征和驾驶人视觉适应特征的基础上, 通过指定试验条件下的实车道路试验采集环境光照度、驾驶人瞳孔面积和视觉适应时间等数据, 建立数理模型, 以 G65 包茂(包头—茂名)高速公路西柞(西安—柞水)段为例, 研究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。结果表明, 驾驶人瞳孔面积与隧道环境光照度之间呈幂函数关系; 隧道连接段长度直接影响进入下游隧道之前的明暗适应水平, 是整个隧道群区段驾驶人视觉适应的主要影响因素; 针对不同连接段长度的环境光照度改善措施是提高隧道群区段行车安全性的有益尝试。

关键词: 交通安全; 隧道群; 驾驶人; 瞳孔; 视觉明暗适应

中图分类号: U491.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)02-0040-05

长隧道、特长隧道和隧道群在改善道路线形、缩短出行距离的同时出现了一些严重的交通安全问题, 调研发现隧道区段事故率约为全线平均事故率的 5.17 倍, 事故总数、受伤人数、死亡人数和经济损失的比例远高于正常区段。驾驶人对光环境的不适应是该现象的重要成因之一。国外对驾驶人视觉特性和驾驶行为的研究开展得较早, 但鲜见针对高速公路隧道群区段驾驶人生理、心理特性的研究。国内的相关研究主要涉及疲劳驾驶、山区公路线形等对驾驶行为的影响, 给出了隧道进出口路段光环境适宜亮度的计算方法, 阐述了驾驶人视觉特征在隧道光环境改善中的应用方案; 针对驾驶人视觉特征的研究主要涉及视点分布、注视时间、注视次数及扫视幅度等参数变化特征, 鲜见对连续隧道群区段驾驶人视觉明暗适应特性的相关研究。该文基于高速公路隧道群区段实车试验, 获取并多维度比较分析表征驾驶人视觉适应特征的指标数据, 匹配典型隧道群出入口段光环境参数, 遵循驾驶人“顺适通过”的原则, 开展隧道群区段驾驶人视觉明暗适应特性研究, 为量化改善隧道群光环境提供理论依据。

1 理论基础

1.1 隧道群特征

隧道群区段的环境光照度值从整体来看变化规

律杂乱无章, 桥隧特殊结构物的随机组合是造成不同细分路段光环境差异明显的主要原因。但细究每条单一隧道, 其内部环境照度值随着隧道纵深延伸具有相似的盆状曲线变化规律。昼间进入隧道后, 环境光照度沿行车方向逐渐下降, 随着行驶时间的推移进入隧道深处, 环境光照度降至较低的几十到一百勒克斯, 驾驶人在隧道深处会明显感觉到光线不足, 无法准确辨识车道线、路面障碍物等道路行车环境, 造成其心理上明显的不适感。

隧道区段道路交通事故分布也呈现一定的规律。根据隧道区段交通事故分时统计结果, 在同一天的不同时段, 事故数量分布呈现出 5:00—6:00、9:00—11:00、13:00—15:00 3 个明显的高峰时段。造成这种分布规律的原因是 13:00—15:00 为外界自然光照相对较强的时段, 隧道洞口内外环境照度存在明显差异, 加之驾驶人此时的生理机能处于相对较低水平, 对隧道内外光环境的明暗变化适应能力较差, 造成该时段交通事故多发。从事故发生位置来看, 在隧道进口段, 发生在洞内的事故数量明显高于洞外; 而在隧道出口段恰恰相反。驾驶人在隧道群区段的加减速行为特征规律一致, 无论是小隧道还是长大隧道, 相对之前的运行速度, 在进隧道口时明显减速、出隧道口时明显加速, 隧道进出口路段是车速急剧变化的敏感区段, 车速的突变容易引发

* 基金项目: 浙江交通职业技术学院 2016 年度学校科技研究基金一般项目(2016YK06)

交通事故。

1.2 视觉适应特征

驾驶人的驾驶过程是一个典型的信息接收、加工和处理过程,可简化为感知、判断及操作过程,区段行车安全的关键依赖于在特定时间里对复杂动态信息的正确感知、准确判断和恰当操作。而驾驶过程中80%以上的信息来自于视觉,驾驶人视觉特性中的视敏度、视野、视觉适应等参数都直接或间接影响行车安全。

在隧道群区段行车时,驾驶人会遭受变化无常的环境光照度的影响,在生理、心理上产生较大压力。瞳孔面积大小在自主神经系统的控制下自主调节,以适应环境变化造成的生理不协调。受到自身生理功能的限制,生理调节加剧或超过生理承受能力会造成驾驶人对信息判断、处理的失误,由此引发交通事故。

2 实车试验

2.1 试验条件

通过对研究主题进行需求分析设计实车试验实施方案。试验在G65包茂(包头—茂名)高速公路西柞(西安—柞水)段实施,该路段包含了中国典型山区高速公路连续隧道群路段,最长的双洞公路隧道秦岭终南山隧道就处于该路段,该隧道单洞全长18.02 km,正常行车穿越时间为15 min。此外,还包含南五台、北九沟等大大小小12座隧道,其相关参数见表1。

表1 西安—柞水方向相关隧道的技术参数

隧道名称	编号	长度/m	隧道间距 L/m
南五台	T1	2 561	70
北九沟	T2	130	430
道沟峪	T3	190	40
清沟	T4	140	60
短隧道	—	—	—
熊沟	T5	80	—
青岔	T6	1 343	380
石砭峪	T7	160	100
终南山	T8	18 020	1 300
小峪口	T9	120	—

2.2 数据采集

在试验方案设计阶段,为保障试验的科学性和有效性,严格限定额外变量对试验数据有效性可能

产生的影响,尽可能选择相同的自然光照条件、天气状况、环境温度和湿度等试验环境,并进行多次简单重复试验。在综合考虑被试者所特有的人口统计学特征的前提下,考虑性别、职业、年龄及驾驶经验等因素对熟练驾驶试验车的影响,在正式试验之前通过训练,使35名被试者对试验车的性能特征有充分了解并能相对熟练地驾驶试验车,减小驾驶人主观因素对试验数据有效性的影响。试验主要采集环境光照度、车辆行驶速度及驾驶人眼动特征参数,所用设备及其功能见表2。

表2 试验设备及其功能

名称	型号	功能
试验车	江铃全顺	试验车
眼动仪	Eye Link II	记录视觉特征参数
车速监控设备	非接触式五轮仪	采集区段速度信息
数据记录仪	Dewetron 32	采集行驶速度信息
高精度亮度计	美能达 LS-100	采集亮度数据
数字照度计	LX1330B	采集环境光照度

3 视觉特征与光环境匹配模型

3.1 瞳孔面积变化规律

在35名被试者中随机挑选1名,提取其在T8终南山隧道对应的试验数据进行分析。以隧道进出口截面为坐标原点,横向坐标轴在行车方向纵向延伸,以50 m为间隔设置数据特征点,纵向坐标轴为驾驶人在相应特征点的瞳孔面积大小,分析结果见图1。

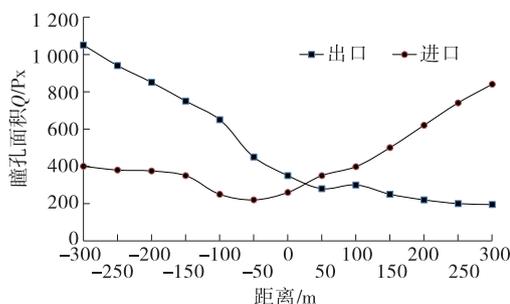


图1 T8隧道进出口路段驾驶人的瞳孔面积

由图1可知:在隧道入口之前300 m至入口截面区段,驾驶人瞳孔面积缓慢下降,经过入口截面之后瞳孔面积快速上升;在出口之前300 m至出口截面区段,瞳孔面积快速下降,经过出口截面之后瞳孔面积缓慢下降直至波动范围极小的稳定状态。进出口路段瞳孔面积的变化规律体现了驾驶人生理自发

调节适应环境光变化的过程。

3.2 瞳孔面积与照度的关系

3.2.1 瞳孔面积特征

进一步考虑驾驶人个体生理差异,根据尽可能排除人口统计学特征影响的原则,从35名被试者中提取9名在T1南五台隧道出口段的试验数据,根据获取的车辆位置信息,以50m为一个单位分别标记B1、B2、B3、…、B13共13个特征点,得到隧道出口区段驾驶人瞳孔面积分布状态(见图2)。

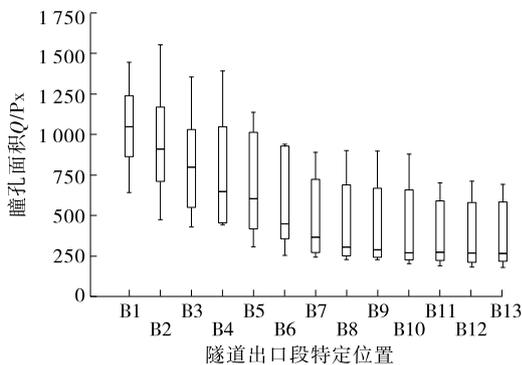


图2 T1隧道出口区段驾驶人瞳孔面积分布状态

从图2可看出:因不同被试者瞳孔面积原始大小的差异,在同一特征点处不同被试者瞳孔面积大小差异较大,部分特征点处的波动较剧烈。9名被试者瞳孔面积平均值呈现逐级递减的规律,在隧道内接近隧道出口的过程中,瞳孔面积递减速度较快,说明正处于视觉明适应较激烈的状态;在驶出隧道出口截面后,瞳孔面积递减速度放缓,至最后2个特征点处基本处于稳定不变状态,说明此时视觉明适应过程已基本完成。

3.2.2 瞳孔面积与照度关系模型

在对试验数据归一化处理的基础上构建驾驶人瞳孔面积 Q 与隧道内环境光照度 E 之间的数量关系模型,取1号被试者昼间在T1南五台隧道出口段的试验数据,绘制二者散点图并进行简单线性回归,结果见图3。根据相关研究, $\ln(Q/E)$ 与 $\ln E$ 之间呈线性关系。

所构建的模型决定系数 R^2 达到0.9883;变量 $\ln(Q/E)$ 与 $\ln E$ 之间的线性关系模型见图3,相关系数 R 为0.994。同理构建另外8名被试者的瞳孔面积 Q 与隧道环境光照度 E 之间的模型,得:

$$\ln(Q/E) = a \ln E + b \quad (1)$$

式中: a 、 b 均为参数,大小取决于具体隧道出口光环境特性及被试者自身生理特性。

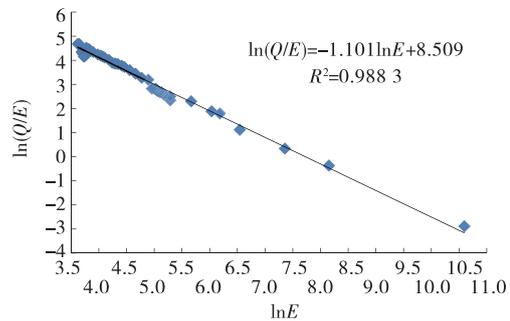


图3 隧道出口段 $\ln E - \ln(Q/E)$ 关系

整理、变换之后的关系模型为:

$$Q = e^b E^{1+a} \quad (2)$$

根据相关研究成果,隧道进出口段环境光照度与距隧道进出口位移之间近似呈幂函数关系,表达式如下:

$$E = \delta d^\gamma \quad (3)$$

式中: d 为距离隧道口位移(m); δ 、 γ 为模型参数。

将式(3)对时间 t 求导,得环境光照度随时间的变化规律为:

$$\epsilon = \frac{dE}{dt} = \delta \gamma d^{\gamma-1} \frac{dd}{dt} = \delta \gamma v d^{\gamma-1} \quad (4)$$

式中: ϵ 为环境光照度变化率(Lx/s); t 为行驶时间(s); v 为车速(m/s)。

以瞳孔面积变化速度 V_Q 反映驾驶人视觉负荷水平,由式(2)和式(4)可知:

$$V_Q = \frac{dQ}{dt} = (1+a)E^a e^b \frac{dE}{dt} = \delta \gamma v (1+a)E^a e^b d^{\gamma-1} \quad (5)$$

利用9名被试者试验数据对模型参数进行标定,得到较为理想和稳定的参数值。隧道进出口路段驾驶人瞳孔面积变化速度与环境光照度之间的关系可用式(5)较准确地描述。在高速公路隧道群区段行车,隧道进出口环境光照度 E 是影响驾驶人瞳孔面积 Q 及其变化速度 V_Q 的主要因素,驾驶人的自主神经系统可通过控制瞳孔面积大小调节进入眼睛的光线,进而自动完成视觉明暗适应过程。不同个体因自身生理素质差异,面对同样的环境光照度变化情况,其瞳孔面积变化速度有差异,但总体视觉明暗适应规律相同。

4 实证分析

4.1 区段规律分析

以试验路段中毗邻的T6青岔隧道至T9小峪口隧道4座隧道构成的连续隧道群区段为例,对驾

驶人视觉明暗适应特性进行实证分析,利用六小段划分方法进行隧道群区段划分(见图4)。

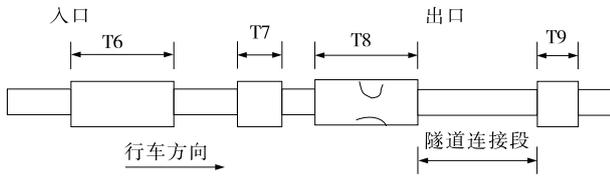


图4 隧道群区段六小段方法划分

4.2 连接段特征分析

隧道群上游隧道出口段视觉明适应水平是影响下游隧道乃至整个隧道群区段视觉适应过程的重要因素。驾驶人在隧道出口远离洞口段将经历一个时间较短的明适应过程,一般在隧道出口5 s行程左右的路段驾驶人视觉明适应过程基本完成,以隧道最高限速80 km/h可推算出隧道出口远离段明适应长度约为100 m。考虑到毗邻隧道的相互影响,隧道间连接段长度 L_f 是分析隧道群区段驾驶人视觉明暗适应规律所应考虑的主要因素之一,其大小直接决定进入下游隧道前驾驶人视觉明适应水平。

L_f 较小时,在上游隧道出口后被试者瞳孔面积沿着行车方向呈不断减小趋势,相应地,明适应持续一定时间后,出现驾驶人瞳孔面积减小量 Q_{Mi} ($i=1,2,\dots,9$),即被试者在特定隧道之间的连接段环境中的瞳孔面积最大值 Q_{MAXi} 与最小值 Q_{MINi} ($i=1,2,\dots,9$)的差值,用该值近似表征隧道连接段驾驶人视觉适应水平。瞳孔面积最大差值 Q_{MV} 为9名被试者 Q_{Mi} ($i=1,2,\dots,9$)的均值, Q_{MV} 越大,视觉适应水平越高。综上可得:

$$Q_{MV} = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 (Q_{MAXi} - Q_{MINi}) \quad (6)$$

以T7石砭峪隧道出口截面为坐标原点、连接段长度 L_f 为横轴、瞳孔面积最大差值 Q_{MV} 为纵轴,整理9名被试者在实证区段的试验数据,绘制散点图,并运用SPSS20.0构建二者之间的关系模型,结果见图5。从中可见两变量之间呈非线性关系。

依据方差分析和回归系数的显著性检验结果,确定将二次曲线作为最佳选择,表达式如下:

$$Q_{MV} = -0.006L_f^2 + 1.144L_f + 13.503, L_f \leq 100 \text{ m}, R^2 = 0.9846 \quad (7)$$

求得 Q_{MV} 的最大值为68 Px,此时 L_f 为95 m,与依据最高限速所推算出的隧道出口远离段明适应长度100 m基本相符。说明可根据式(7)所构建的瞳孔面积最大差值 Q_{MV} 与隧道连接段长度 L_f 之间

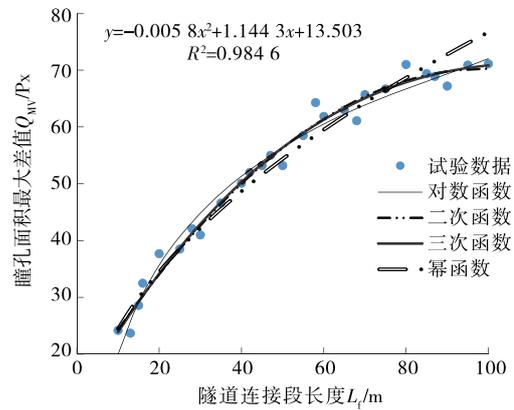


图5 瞳孔面积最大差值模型拟合

的二次函数模型描述隧道群区段毗邻隧道间驾驶人视觉明适应特性。将计算结果与非隧道群区段单一隧道对比,发现在非隧道群区段单一隧道进口段被试者瞳孔面积变化速度更大。在隧道群区段,上游隧道出口段的明适应完成程度主要受隧道间连接段长度的影响,连接段越长明适应越充分,对下游毗邻隧道入口的暗适应影响越小,反义亦然。当隧道连接段长度 L_f 短于100 m时,驾驶人明适应过程并未完成,随即进入下游隧道入口段的暗适应过程。当连接段长度 L_f 长于100 m时,驾驶人在进入下游隧道入口之前已完成上游隧道出口段的明适应过程,进入下游隧道入口之前的瞳孔面积 Q 将维持在与非隧道路段较接近的恒定值附近,此时如果忽略人体自身正常心理、生理活动造成的瞳孔面积小幅波动,可认为 Q_{MV} 为定值,驾驶人明适应完成程度较高,视觉负荷水平稳定在正常状况,进入下游隧道的暗适应过程与非隧道群区段单一隧道进口的暗适应过程没有区别。

5 结语

该文在分析隧道群光环境特征、交通事故特征和驾驶人视觉适应特征的基础上,通过实车隧道试验,采集环境光照度、驾驶人瞳孔面积、车辆行驶速度、行驶时间等数据,建立了隧道环境光照度 E 与距隧道进出口距离 d 之间的幂函数关系、驾驶人瞳孔面积 Q 与环境光照度 E 的指数关系模型和瞳孔面积变化速度 V_Q 计算模型,分析了隧道群区段驾驶人瞳孔面积变化规律。

在隧道群区段照明设置中,应充分考虑驾驶人的视觉明暗适应特性,尽量减小驾驶人生理、心理负荷。隧道群区段毗邻隧道连接段长度大于100 m

时,驾驶人明适应水平较高,否则将直接影响下游隧道入口段的暗适应过程。在调整隧道群连接段及下游隧道进口环境光照度时,应以尽量较少的“明适应”与“暗适应”的转换过程为原则,根据上下游隧道间连接段长度的不同,以保证驾驶人“顺适通过”为标准。在隧道间距小于 50 m 的路段,建议在隧道连接段设置遮光棚或将上游隧道出口设置成照度渐变式出口,显著降低隧道间环境照度,缩小前后隧道洞内照度和隧道间照度差异,减轻驾驶人视觉负荷;当隧道间距为 50~100 m 时,对下游隧道进口照明值的设置进行适当折减,设置成照度渐变式进口。

参考文献:

[1] 郭忠印,廖志高.高速公路隧道交通流实时事故风险监视与控制研究[A].第四届全国公路科技创新高层论坛论文集[C].2008.

[2] 丁光明,刘浩学,赵炜华,等.高速公路长隧道出口段驾驶人视觉特征变化规律[J].长安大学学报:自然科学版,2011,31(2).

[3] 张贤康,陈绍辉,张竞奇,等.短距离连续公路隧道群光环境特征及减光措施研究[J].交通节能与环保,2016,

12(6).

[4] 王辉,刘浩学,赵炜华,等.公路隧道环境中交通事故特征分析[J].公路,2009(11).

[5] 周忠业,廖志高,柳本民,等.高速公路隧道群行车特性及安全性分析[J].交通与计算机,2008,26(1).

[6] 贾洪飞,司银霞,唐明,等.基于认知心理学的驾驶员信息加工模式研究[J].中国安全科学学报,2006,16(1).

[7] 叶飞.高速公路隧道群区段驾驶人视觉明暗适应变化规律研究[D].西安:长安大学,2014.

[8] 林森.高速公路长隧道出口段昼间照明优化研究[D].西安:长安大学,2012.

[9] 郭利平,屈永照,徐北平.西汉高速公路秦岭隧道照明系统改善研究[J].公路与汽运,2011(1).

[10] 马壮林,邵春福,李霞.高速公路隧道交通事故严重程度的影响因素分析[J].北京交通大学学报,2009,33(6).

[11] 周娜.高速公路隧道群交通运行环境分析与评价研究[D].西安:长安大学,2010.

[12] 陈磊,张生瑞.高速公路隧道群路段安全设施设置问题[J].公路,2012(12).

收稿日期:2017-07-11

(上接第 39 页)

耗,只能缓解,不能彻底解决。随着城市经济的发展、城市空间的不断扩张,城市面临越来越严重的交通拥堵,威胁着城市的可持续发展。城市交通拥堵的成因复杂,涉及到城市及交通规划、交通管理等诸多方面,应从发展公共交通、城市及交通规划、建设综合交通体系、加强交通需求管理等方面入手,提出治理城市交通拥堵的对策,提高城市效率和可持续发展能力。

参考文献:

[1] Green shields B D,Bibbins J R,Channing W S,et al.A study of traffic capacity[J].Highway Research Board Proceedings,1935,14.

[2] Downs A.The law of peak-hour expressway congestion [J].Traffic,1962,33(3).

[3] 张文艳.我国城市交通拥挤治理的对策研究[D].青岛:青岛大学,2012.

[4] 黄伟民.国内城市交通治堵可行性方案探讨[J].政策研究,2012,26(3).

[5] 刘治彦,岳晓燕,赵睿.我国城市交通拥堵成因与治理对策[J].城市发展研究,2011,18(11).

[6] 李建民,张程宏,高建宇.公共交通优先:城市交通拥堵的解决之道[J].城市道桥与防洪,2005(1).

[7] 洪豆,辛拓.西安市轨道交通线网规划与城市布局的可持续发展研究[J].重庆交通大学学报:社会科学版,2017,17(2).

[8] 王振坡,崔晴晴.我国城市交通拥堵问题治理思路的反思与匡正[J].城市,2013(2).

[9] 姚文捷.城市交通拥堵治理[D].杭州:浙江师范大学,2012.

[10] 何玉宏,谢逢春,郝忠娜.国内外城市交通拥堵治理分析与借鉴[J].城市观察,2013(2).

[11] 谢留宏,路峰,张俊辉,等.北京实行错峰上下班解决交通拥堵问题的分析探讨[J].交通标准化,2011(增刊).

[12] 交通运输部道路运输司.城市交通拥堵治理实践[M].北京:人民交通出版社,2013.

[13] 朱耀兵.厦门市电召出租车实践研究[J].重庆交通大学学报:社会科学版,2015,15(6).

[14] 郭继孚,刘莹,余柳.对中国大城市交通拥堵问题的认识[J].城市交通,2011,9(2).

收稿日期:2017-10-30