

基于虚拟现实技术的隧道内光源色温对 司驾安全的影响

李晓军^{1,2,3}, 凌加鑫¹, 沈奕^{1,2,3}, 卢彤⁴, 朱合华^{1,2,3}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 3. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 4. 钱江新城建设管理委员会, 浙江 杭州 310016)

摘要: 基于虚拟现实(VR)技术建立公路隧道内环境智能辅助决策系统,在不同色温的主灯照明下进行驾驶模拟试验,构建注意力增长率和光源色温之间的度量模型,并给出反应时间的分布规律。结果表明:在隧道入口和出口处,驾驶人的注意力增长率较高,行驶约1 200 m时驾驶人注意力达到最低值;不同的光源色温对驾驶人注意力影响差异显著,色温约6 300 K时最利于注意力的集中;低色温下(2 000~4 000 K)驾驶人对事故的反应时间约为0.78 s,而中高色温下(5 000~8 000 K)驾驶人对事故的反应时间约为0.58 s。

关键词: 驾驶安全;虚拟现实(VR);光源色温;脑机接口

中图分类号: TU921; TU205

文献标志码: A

Effect of Color Temperature of Light Source in Tunnel on Driving Safety Based on Virtual Reality Technology

LI Xiaojun^{1,2,3}, LING Jiaxin¹, SHEN Yi^{1,2,3}, LU Tong⁴, ZHU Hehua^{1,2,3}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Qianjiang New CBD Construction and Management Committee, Hangzhou 310016, China)

Abstract: An intelligent decision-making system for the environment in road tunnel was established based on virtual reality (VR) technology. Driving simulation experiments were carried out at different color temperatures to establish a measurement model between the growth rate of attention and the color temperature of

light source, and the distribution of reaction time was given. The results show that at the entrance and exit of the tunnel, drivers' attention growth rate is higher and drivers' attention reaches the lowest level after driving about 1 200 m. The color temperature of different light sources has a significant difference in the effect on drivers' attention. The color temperature of 6 300 K is the best for the concentration of attention resources. Under low color temperature (2 000–4 000 K), the driver's reaction time to the accident is about 0.78 s, while under medium and high color temperature (5 000–8 000 K), the driver's reaction time to the accident is about 0.58 s.

Key words: driving safety; virtual reality (VR); color temperature of light source; brain-machine interface

公路隧道内部空间结构封闭,单调的内部环境会影响驾驶人对周边环境信息的正确感知,进而直接影响驾驶人的驾驶行为,严重时将引发交通事故^[1]。隧道内交通事故的发生,易致使道路通行能力大幅下降,进而波及区域路网的运行效率和交通功能的发挥,并且隧道内发生交通事故后处理困难,极易造成群死群伤^[2]。因此,良好的隧道内部环境是保障隧道内安全驾驶的重要条件。

在针对隧道内部环境优化的探究过程中,隧道光环境的优化是一直以来的研究重点^[3]。隧道光环境主要由照明灯具发光营造,色温作为影响灯具照明效果的一项重要指标,引起了越来越多学者的关注。崔璐璐^[4]研究了隧道照明光源光色对驾驶员视觉的影响,发现色温6 400 K时光源产生的视觉功效

收稿日期: 2020-07-30

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2101000);上海市青年科技英才扬帆计划(20YF1451400)

第一作者: 李晓军(1975—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为隧道与地下结构分析与计算等。

E-mail: lixiaojun@tongji.edu.cn

通信作者: 沈奕(1988—),男,研究员,工学博士,主要研究方向为隧道与地下结构分析与计算等。

E-mail: evanedinburgh@163.com



论文
拓展
介绍

比2 700 K时光源产生的视觉功效高,目标更易被识别。Dong等^[5]研究发光二极管(LED)光源的相关色温对人眼视觉表现的影响,结果表明观察者的反应时间与光源色温成负相关。在此基础上,Dong等^[6]继续研究了隧道入口段光源色温对隧道暗适应的影响,色温为4 000~4 500 K时LED光源更适合用于隧道入口的照明。左小磊^[7]、史芊芊^[8]研究了隧道照明光源色温对驾驶员的影响后指出,选择隧道照明光源时,优先选择高色温光源。然而,这些研究中多使用小目标测量法,反应时间等参数的测定易受主观因素影响,并且光学系统箱^[7]、激光投影仪^[8]等设备并不能真实还原隧道驾驶场景。隧道照明领域对光源色温的研究日趋关注,但相关研究一直未能对现有的照明设计形成指导。

脑电波(EEG)信号因其良好的时间分辨率和精度^[9],被认为是检测驾驶疲劳的“金标准”^[10]。EEG信号主要包括 α 波、 β 波、 θ 波和 δ 波,通过对原始数据的时频域分析进而提取特征信号,可应用于不同年龄驾驶人疲劳特性^[11]、长途客车驾驶人疲劳状态^[12]等研究中。在光源色温与EEG信号关系方面,Park等^[13]通过改变光源色温来研究试验人员的EEG信号变化情况,发现色温的变化会引起脑电信号中 α 波的显著变化。Shin等^[14]利用单通道EEG信号来表示不同光照条件下被试者的注意力和放松程

度,结果表明高色温、高照度的LED灯更能提高被试者的注意力水平。这些研究揭示了光源色温与EEG信号的关联性,但是缺少关于隧道内光源色温对驾驶过程中EEG信号变化影响的研究。

针对以上问题,提出了基于虚拟仿真技术的隧道内环境改善方法。以驾驶模拟试验为基础,以司驾人员的EEG信号为生理指标,集成虚拟现实(VR)设备、模拟驾驶设备和EEG信号测量设备,搭建隧道内环境智能辅助决策系统。通过建立并导入不同内环境下的隧道模型,在系统中开展虚拟驾驶,研究不同色温下司驾人员的反应时间和EEG信号变化规律,以进一步探究光环境与驾驶人之间的关系,并探讨采用VR技术进行隧道安全驾驶模拟的准确性,以期为隧道光环境设计及改善提供参考。

1 试验方案

1.1 试验系统

为实时记录被试者在驾驶过程中的EEG信号,选用BrainCo公司的Focus 1脑机接口头环,如图1a所示。采用罗技公司生产的力反馈天驹来模拟真实驾驶感受,并记录驾驶过程中车辆的运行状态,如图1b所示。采用HTC公司生产的VIVE pro设备,还原隧道内部环境,如图1c所示。



图1 试验设备

Fig.1 Test equipment

软件方面,采用Unity3D软件,开发虚拟驾驶场景,并集成上述设备,实现隧道内环境智能辅助决策系统的搭建。

1.2 工程背景

选取杭州市博奥隧道为试验路段。如图2所示,博奥隧道全长2 771 m,为双向四车道城市干道,隧道设计行车速度 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,预计2020年底通车。

作为2022年杭州亚运会的核心通道,为体现杭州市精致和谐的时代特征以及创造驾驶安全环境,需对博奥隧道内部光环境进行设计。由于实车试验的不可行性,因此采取虚拟仿真试验方法,研究最佳

光环境设计方案。

1.3 被试者选择

试验中招募不同年龄、不同驾龄的驾驶人30名,满足被试者驾龄在1年以上的要求,视觉机能正常、无生理缺陷并有通过隧道段的行车经验。为避免外部因素影响,被试者在试验前1 h内未进行激烈运动,前12 h内未饮用含酒精或可卡因饮品,以保证试验数据的合理性和客观性。

1.4 试验步骤

在正式试验前,首先利用3ds Max软件建立不同的隧道内环境模型并添加贴图,然后导出格式为



图2 虚拟仿真试验隧道位置

Fig.2 Location of virtual simulation test tunnel

fbx的文件,最后将文件导入隧道内环境智能辅助决策系统中。隧道模型导入系统后,先按照既定驾驶任务进行预试验,以确保正常驾驶。

正式试验时,被试者先穿戴设备静坐3 min,在EEG信号平稳后,被试者按照既定路线进行虚拟驾驶。在虚拟驾驶过程中,按时间顺序记录EEG信号。虚拟仿真试验场景如图3所示。

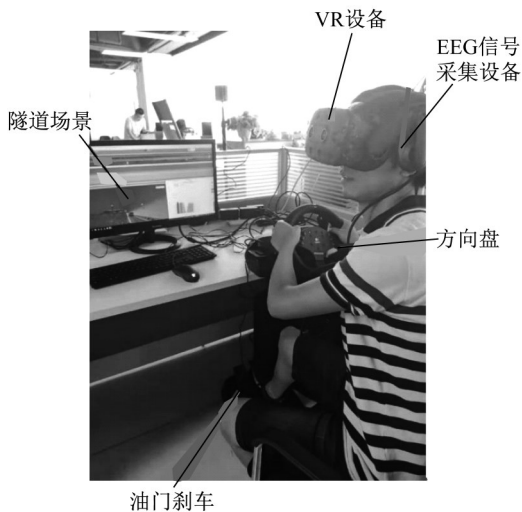


图3 虚拟驾驶场景

Fig.3 Virtual driving scene

1.5 数据采集

1.5.1 EEG信号

相关驾驶研究表明,驾驶分心和注意力不集中是引发交通事故的主要原因^[15]。基于此,研究试验过程中驾驶人EEG信号的变化情况,并用EEG信号

表征注意力集中程度,采集到的注意力数据 n 为EEG信号数据的量化,即 $n=f(\alpha, \beta, \theta, \delta)$ 。数据采集段为隧道进口段至隧道出口段,采集频率设置为2 Hz。

驾驶员之间存在个体差异,仅比较注意力值的高低或增减次数,并不能全面体现内环境对安全驾驶的影响^[16]。因此,采用注意力增长率 p 来表示注意力变化情况,计算式如下所示:

$$p = \frac{n_2 - n_1}{n_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: n_1 为平静状态下被试者注意力值; n_2 为驾驶过程中被试者注意力值。

1.5.2 反应时间

突发情况下驾驶人的反应时间是指驾驶人察觉到突发异常情况可能对自身驾驶造成影响、做出避让决定到车辆运动状态发生变化的整个过程所耗费的时间^[17]。本研究中测量反应时间的方式是通过集成模拟驾驶设备监测制动踏板和方向盘的状态数据,记录异常工况出现到车辆运动状态发生改变的时间,计算式如下所示:

$$t_r = t_c - t_s \quad (2)$$

式中: t_r 为反应时间; t_c 为车辆制动踏板或方向盘状态发生变化的时刻; t_s 为事故工况出现的时刻。

2 正常驾驶工况下色温影响

2.1 模型设计

为研究光源色温对驾驶安全的影响,保证光源

亮度为 $2\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ 不变且内装饰环境一致, 分别对光源色温为 2 000、3 000、4 000、5 000、6 000、7 000、8 000 K 时的隧道场景进行试验。3 种典型色温下隧道模型如图 4 所示。

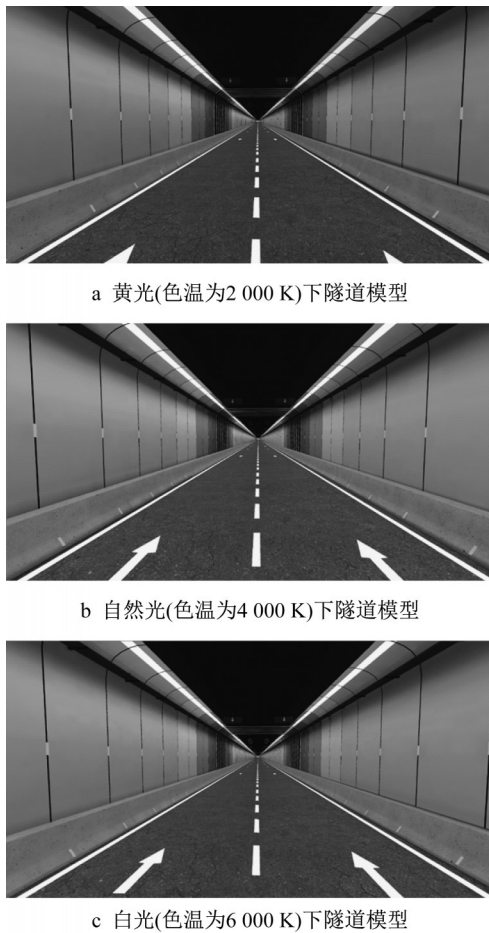


图 4 不同色温下隧道模型

Fig.4 Tunnel models at different color temperatures

2.2 试验结果与分析

2.2.1 自然光下注意力增长率随驾驶时间变化特征

为了研究隧道驾驶过程中驾驶员的注意力变化情况, 选择光源为自然光(色温为 4 000 K)的隧道模型进行试验。通过对每位被试者的注意力增长率数据进行筛选和平均处理, 获得注意力增长率与驾驶路程的数据。自然光下注意力增长率和距隧道入口距离的关系如图 5 所示。

从图 5 看出, 驾驶人进入隧道前后注意力明显集中, 相比于平静状态下注意力更高, 表明驾驶人给予较多注意力资源在进入隧道前后。进入隧道后, 注意力增长率呈波动下降趋势, 注意力值长时间低于平静状态下注意力值, 并且在行驶 1 200 m 左右时达到最低; 在隧道出口前后, 驾驶人注意力再次波动

上升, 注意力再次集中, 并高于平静状态下注意力。

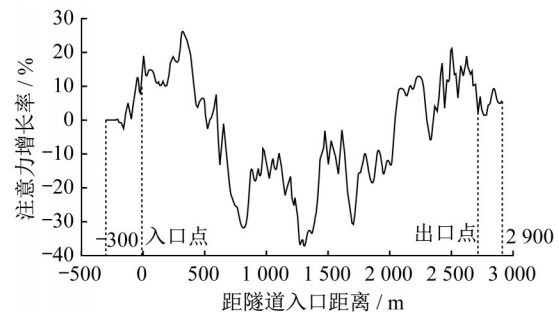


图 5 注意力增长率和距隧道入口距离的关系(4 000 K)

Fig.5 Relationship between attention growth rate and distance from tunnel entrance(4 000 K)

由此可见, 在隧道出入口位置, 驾驶人的注意力集中于驾驶任务, 注意力增长率较高; 进入隧道后, 随着驾驶时间和里程的增加, 驾驶人出现驾驶疲劳, 注意力分散, 注意力增长率降低。

2.2.2 不同色温下注意力增长率变化特征

不同色温下驾驶人注意力增长率统计结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 相比于低色温(2 000~4 000 K), 高色温(6 000~8 000 K)下驾驶人的平均注意力增长率更高, 并且均方差更小。这表明, 高色温有利于驾驶人注意力的提高, 注意力波动较小, 不易分散。然而, 色温并不是越高越好。例如, 相比于 8 000 K, 光源色温为 6 000 K 时驾驶人的平均注意力增长率更高。

表 1 不同色温下驾驶人注意力增长率统计结果

Tab.1 Statistical results of drivers' attention growth rate at different color temperatures

色温/K	平均注意力增长率/%	注意力增长率均方差/%
2 000	-13.02	79.30
3 000	-4.78	59.44
4 000	-2.04	99.64
5 000	7.93	63.69
6 000	8.21	39.55
7 000	6.72	46.71
8 000	3.11	43.32

为了进一步研究色温与注意力增长率之间的关系, 得到最合适的光源色温, 以色温为自变量, 平均注意力增长率为因变量, 量化注意力增长率变化规律。构建“注意力增长率-色温”模型, 将表 1 中数据分别代入下式:

$$y=ax^2+bx+c \tag{3}$$

式中: x 为自变量; y 为因变量; a 、 b 、 c 均为回归系数。

应用 OriginPro 2017 软件进行数据拟合, 得到“注意力增长率-色温”拟合结果, 如图 6 所示。模型

方差分析结果如表2所示。

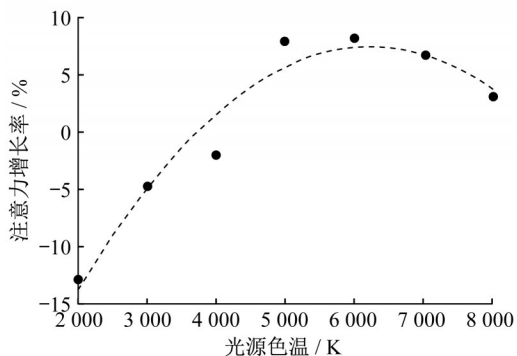


图6 注意力增长率和光源色温拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of attention growth rate and color temperature of light source

驾驶人平均注意力增长率和光源色温拟合曲线的决定系数(COD) $R^2 = 0.9476$ 。从表2可看出,显著性概率 $p = 0.006 < 0.050$,说明拟合度较好。平均注意力增长率计算式为

$$p_a = -1.1879 \times 10^{-6} T_c^2 + 0.0148 T_c - 38.6479 \quad (4)$$

式中: p_a 为平均注意力增长率; T_c 为光源色温。

表2 注意力增长率与光源色温关系模型方差分析结果

Tab.2 Variance analysis results on relationship between attention growth rate and color temperature of light source

方差来源	自由度	平方和	均方	F值	p
回归	3	361.931	120.644	24.473	0.006
剩余	4	19.718	4.930		
未修正总数	7	381.650			
修订后总和	6	376.282			

从图6和式(4)可以看出,色温为2000~6300 K时,随着色温的增加,驾驶人平均注意力增长率呈上升趋势;色温为6300~8000 K时,驾驶人平均注意力增长率随着色温的增加而缓慢减小。因此,从驾驶人注意力角度,隧道内光源宜采用色温为6300 K左右的高色温光源。

3 事故工况下色温影响

3.1 模型设计

为了更贴合实际驾驶情形,设计了隧道内追尾事故工况,如图7所示。



图7 隧道模型内追尾事故

Fig.7 Rear-end collision in tunnel model

由图5可知,在隧道内驾驶1000~1500 m时,驾驶人注意力会进入一个低谷,因此追尾事故设置在距入口1200 m位置处,考察当隧道内出现追尾事故时,驾驶人在不同色温下的反应时间及EEG信号波动规律。

3.2 试验结果与分析

3.2.1 反应时间差异性显著检验

不同色温下隧道内驾驶人反应时间变化特征如图8所示。图8为箱线图和折线图的组合图,箱线图反映了不同色温下反应时间的离散程度,折线图反映了平均反应时间随色温变化的规律。

从图8可看出,不同色温下驾驶员反应时间平

均值分布在0.5~1.0 s,相比于2000~4000 K,5000~8000 K时反应时间离散程度更小。光源色温从2000 K增加到5000 K时,反应时间不断降低;色温从5000 K增加到8000 K时,反应时间略有波动但是起伏不大,维持在一个相对较低的水平。

为了进一步分析色温对反应时间的影响,应用单因素方差分析对不同色温下驾驶人反应时间进行差异性检验,发现7种色温下驾驶人的反应时间存在总体显著差异($p = 0.000$)。利用续后分析进一步探讨7种色温下反应时间的显著性差异,如表3所示。表3中,未列的色温组合表明不存在显著性差异。

表 3 不同色温下单因素方差分析结果
Tab.3 Results of one-way ANOVA at different color temperatures

色温	不同色温下单因素方差分析结果				
	4 000 K	5 000 K	6 000 K	7 000 K	8 000 K
2 000 K	*	***	**	***	***
3 000 K	/	***	*	**	***
4 000 K	/	*	/	/	*

注:/ 表示 $p \geq 0.05$, * 表示 $p < 0.05$, ** 表示 $p < 0.01$, *** 表示 $p < 0.001$ 。

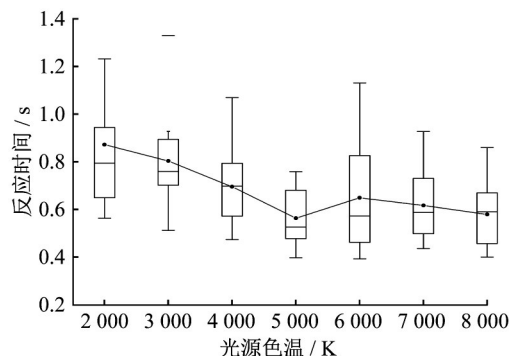


图 8 反应时间随光源色温变化
Fig.8 Change of reaction time with color temperature of light source

表 3 表明,驾驶人在隧道内行驶、色温为 2 000 K 时的反应时间显著高于色温为 4 000 K ($p = 0.011$)、5 000 K ($p = 0.000$)、6 000 K ($p = 0.005$)、7 000 K ($p = 0.000$)和 8 000 K ($p = 0.000$)时的反应时间,色温为 3 000 K 时的反应时间则显著高于色温为 5 000 K ($p = 0.000$)、6 000 K ($p = 0.041$)、7 000 K ($p = 0.004$)和 8 000 K ($p = 0.000$)时的反应时间,色温为 4 000 K 时的反应时间则显著高于色温为 5 000 K ($p = 0.016$)和 8 000 K ($p = 0.040$)时的反应时间。

从图 8 和表 3 可知,光源色温对驾驶人反应时间有显著影响。当色温较低时(2 000~4 000 K),反应时间较长;当色温提高至 5 000 K 及以上时,驾驶人反应时间显著降低,为 0.5~0.6 s。

3.2.2 反应时间分布及拟合

由第 3.2.1 节可知,5 000~8 000 K 下反应时间不存在显著性差异,因此将色温分为两组,低色温组(2 000~4 000 K)和中高色温组(5 000~8 000 K),量化两类色温条件下驾驶人的反应时间。

已有研究表明^[17],驾驶人反应时间近似服从正态分布,因此对两类色温条件下驾驶人反应时间进行正态分布拟合。正态分布的概率分布函数为

$$f(t_r') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t_r' - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

式中: t_r' 为异常工况下驾驶人的反应时间,s; μ 为驾驶人反应时间的均值,s; σ 为驾驶人反应时间的标准差,s。

拟合结果如图 9 所示。低色温(2 000~4 000 K)时, $R^2 = 0.936$,拟合效果较好,拟合均值 $\mu = 0.781$ s,标准差 $\sigma = 0.112$ s;中高色温(5 000~8 000 K)时, $R^2 = 0.869$,拟合效果较好,拟合均值 $\mu = 0.575$ s,标准差 $\sigma = 0.150$ s。

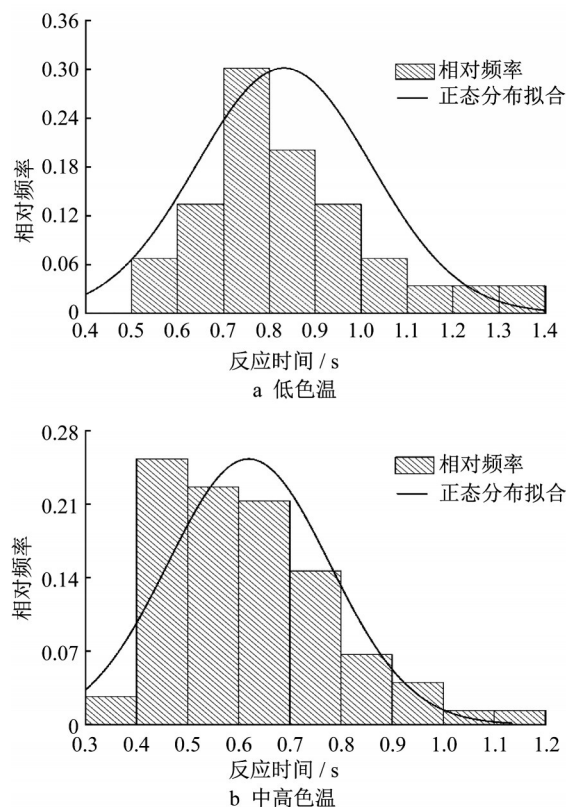


图 9 两类色温下驾驶人反应时间分布及拟合曲线
Fig.9 Distribution of drivers' reaction time at two kinds of color temperatures and its fitting curve

从图 9 可以得到:驾驶员对异常工况的反应时间可以看作服从正态分布;当隧道内光源色温较低时(2 000~4 000 K),驾驶人的平均反应时间为 0.78 s,长于隧道内光源色温较高时(5 000~8 000 K)的平均反应时间 0.58 s。

3.2.3 EEG 信号波动规律

从试验数据中筛选出距离事故点前后 50、100、150、200、250、300 m 位置的注意力增长率,得到不同色温下经过事故点时驾驶人的 EEG 信号变化特征,如图 10 所示。

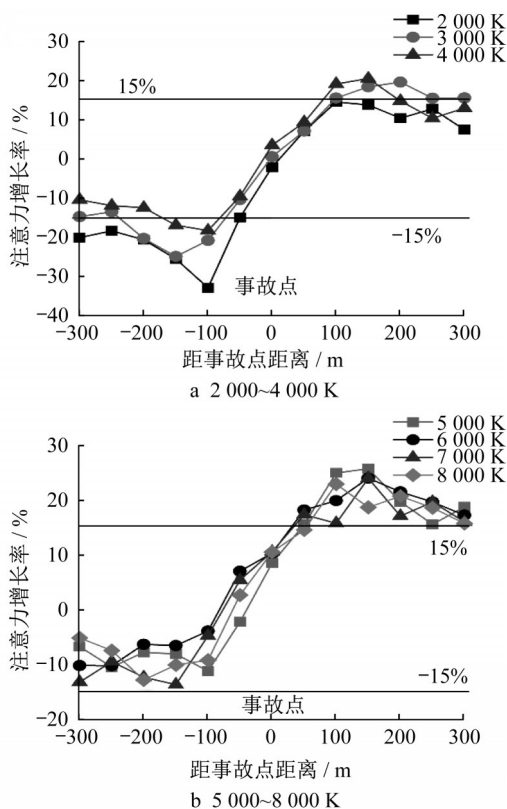


图10 不同色温下经过事故点前后驾驶人EEG信号变化
Fig.10 Changes of EEG signals before and after passing accident point at different color temperatures

从图10可以看出,经过追尾事故点前后,驾驶人的注意力有较大提升。到达事故点前,色温为2 000~4 000 K时,驾驶人的注意力增长率低于-15%,并且2 000 K和3 000 K时驾驶人注意力低于-20%,而5 000~8 000 K时驾驶人注意力增长率保持在-15%以上;驶离事故点后,光源色温为5 000~8 000 K时驾驶人注意力增长率保持在15%以上,而光源色温为2 000~4 000 K时驾驶人注意力增长率在15%左右波动。因此,从EEG信号的角度来看,光源色温为5 000~8 000 K时驾驶人注意力更为集中,相比2 000~4 000 K时更不易出现驾驶疲劳。

4 结论

(1)运用VR技术,建立隧道内环境智能辅助决策系统,模拟隧道内光源色温变换和隧道追尾事故,还原真实驾驶感受。

(2)正常驾驶时,光源色温对驾驶人注意力影响显著,高色温下驾驶人的平均注意力增长率更高且

均方差更小。通过构建注意力增长率与光源色温的关系模型,量化了驾驶人平均注意力增长率与光源色温之间的关系,得出6 300 K左右的光源最利于注意力资源集中。

(3)当隧道内出现事故时,光源色温对驾驶人反应时间有显著影响。低色温(2 000~4 000 K)下驾驶人对事故的反应时间约为0.78 s,而中高色温(5 000~8 000 K)下驾驶人对事故的反应时间约为0.58 s。

作者贡献声明:

李晓军:建立系统架构。
凌加鑫:进行试验研究。
沈奕:进行数据分析。
卢彤:进行科研协调。
朱合华:进行方法指导。

参考文献:

- [1] 丁光明. 高速公路隧道环境对驾驶人生理及心理影响研究[D]. 西安:长安大学,2011.
DING Guangming. Study on the impact of freeway tunnel environment on drivers' physiology and psychology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [2] 杜志刚,潘晓东,杨轶,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.
DU Zhigang, PAN Xiaodong, YANG Zhen, et al. Research on visual turbulence and driving safety of freeway tunnel entrance and exit[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(5):101.
- [3] 杜志刚,徐弯弯,向一鸣. 基于视线诱导的公路隧道光环境优化研究框架[J]. 中国公路学报,2018,31(4):122.
DU Zhigang, XU Wanwan, XIANG Yiming. Research on light environment improvement framework of highway tunnel based on visual guidance [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(4):122.
- [4] 崔璐璐. 隧道照明光源的光色研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
CUI Lulu. Study on the color of tunnel light source [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [5] DONG L, QIN L, XU W, et al. The impact of LED correlated color temperature on visual performance under mesopic conditions [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(6): 1.
- [6] DONG L, SHANG X, ZHAO Y, et al. The impact of LED light color on the dark adaptation of human vision in tunnel entrances[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(5): 1.
- [7] 左小磊. 关于光源色温对隧道照明效果影响的研究[D]. 大连:大连海事大学,2017.
ZUO Xiaolei. Study on the influence of color temperature of

(下转第288页)