

文章编号:1671-8879(2015)06-0135-06

瞳孔测量法应用于疲劳检测的适应性

丛晓妍,王增才,徐俊凯,张万枝,李云霞

(山东大学 机械工程学院,山东 济南 250061)

摘要:为了研究瞳孔测量法应用于实际疲劳检测的可行性,在疲劳检测试验中为瞳孔数据采集配置了恒定人造光环境,检测了露天作业挖掘机驾驶人的疲劳状态,探讨了瞳孔测量法应用于实际生产中的适宜条件。参试人员 16 人,平均分为 2 组,1 组为试验组,1 组为对照组。试验组执行挖掘机驾驶作业 2 h,对照组在同样工作场地进行挖掘机静态检修 2 h,对采集的数据进行傅里叶变换和统计分析。研究结果表明:试验组作业后瞳孔尺寸振荡幅度增大,瞳孔出现缩小,与作业前瞳孔尺寸差异显著($p < 0.05$);对照组作业后瞳孔振幅没有明显变化,瞳孔放大,与作业前差异不明显($p > 0.05$)。因此,自然光照环境中驾驶作业积累的疲劳,在数据采集时限定光照(670 lx),瞳孔法能够予以有效检测。

关键词:汽车工程;疲劳检测;瞳孔测量法;光照

中图分类号:U461.91; R318.5 **文献标志码:**A

Pupillary parameters as an objective tool for fatigue assessment

CONG Xiao-yan, WANG Zeng-cai, XU Jun-kai, ZHANG Wan-zhi, LI Yun-xia

(School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China)

Abstract: In order to investigate the feasibility of pupillometry in practical fatigue detection, stable light conditions were established to test the fatigue degree of excavator drivers who worked outdoors and the suitable conditions for pupillometry in practical production were also discussed. 16 excavator drivers were divided into two groups averagely; one was task group who drove excavator for 2 hours and the other was control group who did ex-work inspection for 2 hours at the same working site without starting excavator. Fourier transform and statistical analysis were applied to the collected data. The results show that after the prescribed task, amplitude in pupillogram of the task group increases and pupil diameter decrease, which indicates a significant difference in pupil size comparing with that before the task (Paired Samples Test, $p < 0.05$); However, as for control group, there are no significant changes in amplitude and pupil diameter increases, which doesn't indicate a significant difference comparing with that before the task ($p > 0.05$). Therefore, pupillometry can detect workers' fatigue accumulated in natural light environment effectively under an ordinary artificial light environment (670 lx) in data collecting. 3 tabs, 7 figs, 18 refs.

Key words: automotive engineering; fatigue assessment; pupillometry; illumination

收稿日期:2015-06-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51174126)

作者简介:丛晓妍(1979-),女,山东威海人,工学博士研究生,E-mail:congzhixiao@163.com。

0 引言

疲劳损伤认知机能,降低工作者操作能力,是导致事故的重要原因^[1-3]。疲劳检测具有重要意义,是驾驶和工作场所工效学等领域的研究热点。目前,国内外疲劳客观检测方法大致分为 3 类:一是检测驾驶人的生理指标^[4-5],如脑电、心电、肌电信号;二是检测驾驶人行为^[6],如眼睑眨动、头部位移;三是检测驾驶人操纵行为、车辆行驶轨迹等^[7-8],如车道偏离,转向盘转角等。尽管目前疲劳检测技术取得一定进展,但各种方法都有一定的应用局限性。理想的疲劳检测方法应具有基于生理学,方便、快速、非侵入及可重复进行等特点^[9]。瞳孔测量法能够满足以上要求,且对驾驶作业与车间作业引发的不同疲劳表现都能够予以检测,是一种具有独特优势的疲劳检测方法。Lowenstein 等较早研究了黑暗环境下疲劳对瞳孔直径的影响^[10];Wilhelm 等在实验室弱光条件下用瞳孔测量法研究白昼变化对中枢神经系统的影响^[11];李勇等在实验室内研究了阅读疲劳和心理负荷对瞳孔大小的影响^[12]。

由于瞳孔尺寸受光线变化影响大,以往瞳孔测量法研究多在实验室条件,尤其是黑暗环境下进行。严格的无光照条件能够保证瞳孔测量法的有效性,但限制了其在实际生产中的应用。因此,本次试验希望验证在数据采集时限定光照条件(670 lx)的情况下,瞳孔法能否有效检测自然光照条件下驾驶作业积累的疲劳,为在实践生产中使用瞳孔尺寸作为疲劳检测手段做条件确定。

1 试验原理

瞳孔是光线进入眼内的门户,其尺寸由 2 种虹膜平滑肌的相对活动控制^[13-14]。这 2 种作用相反的肌肉受交感神经和副交感神经的支配,通过大脑交感神经系统的神经末梢,也和边缘系统连接在一起,而边缘系统参与大脑活动。当边缘系统活跃时,控制虹膜的肌肉就会得到扩大瞳孔的指令;当边缘系统进入抑制状态,这块肌肉就会变得无力,瞳孔就会变小^[10]。瞳孔的这种自发行为在黑暗中表现的非常明显,能够反映人体的疲劳状态^[15]:处于警惕状态的试验者瞳孔尺寸长时间内保持稳定;相反,疲劳试验者瞳孔尺寸缩小且有起伏(图 1)。这种起伏被认为由中央交感神经抑制的不稳定性引起,与疲劳、瞌睡具有很强的相关性。因此,可以通过瞳孔测量来检测驾驶人的疲劳状态。

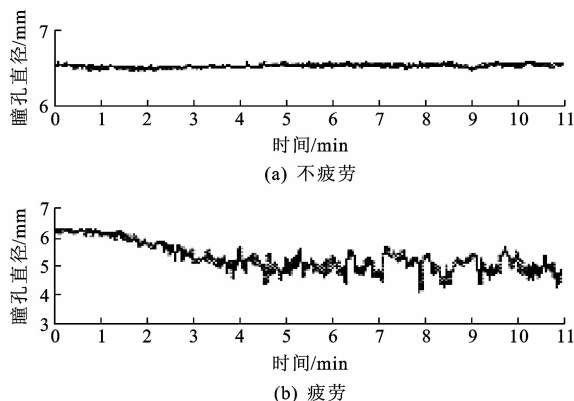


图 1 瞳孔测量法中疲劳与不疲劳状态的瞳孔缩散原理
Fig. 1 Pupillographic sleepiness test (schematic overview)
with two different examples for pupillograms
(stable=alert, instable=tired)

2 试验方法

2.1 试验对象

专业挖掘机驾驶人 16 人(男性,平均年龄 28 ± 8 岁),至少 2 年驾驶经验,无既往眼部手术病史,无睡眠障碍。试验前保证至少 3 日充足睡眠,避免烟、酒、茶、咖啡等刺激性食物与药物。分为 2 组,每组 8 人,1 组试验组,1 组对照组。

2.2 试验设备

LG685 小型挖掘机(山东临工生产);RED 眼动仪(德国 SMIVision 公司生产)。

2.3 试验时间

试验时间为上午 8:30~10:30。充分休息、身体状态良好的人体,警惕性最高的时间段为上午 9 时左右^[16],在警惕性最佳时间段内进行试验,可以减小瞳孔尺寸生理波动的影响。

2.4 测量方法

试验前,试验者进入数据采集地,适应环境光线 5 min,该时间段内填写疲劳状态自我评价表(Likert 五级量表)^[17],5 min 结束采集瞳孔数据,试验组进入露天工作场地驾驶挖掘机进行作业;对照组进入同样露天场地,不启动挖掘机进行静态检修工作。2 h 后回到数据采集地,适应采集地光线 5 min 并填写疲劳状态自我评价表,然后进行瞳孔数据采集。

2.5 试验场地

数据采集地配置恒定人造光环境(普通室内光线,670 lx)。

2.6 试验分析

采用离线方式对试验组和对照组数据进行分析对比。首先剔除眨眼造成的 0 值点,然后使用滤波

去噪,如图 2、图 3 所示。其方法为:如果检测点 d_i 值大于(小于)前一点 d_{i-1} 值的 50%,即 $d_i/d_{i-1} \geq 3/2$ 或 $d_i/d_{i-1} \leq 1/2$,则计算前 3 点均值 d_m ,将该点值设为前 3 点均值,即 $d_i = d_m$ 。

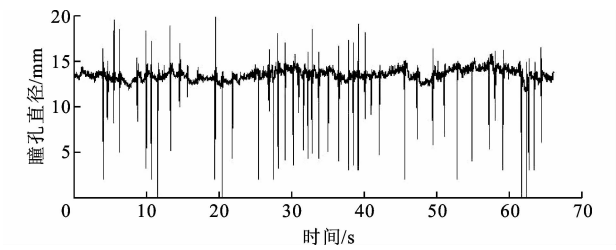


图 2 去噪前瞳孔尺寸

Fig. 2 Pupillographic sleepiness test with noise

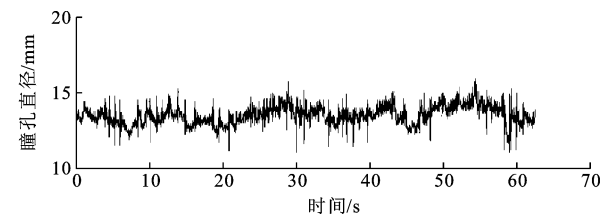


图 3 去噪后瞳孔尺寸

Fig. 3 Pupillographic sleepiness test after denoising

然后,使用 2 种方法进行分析:

(1) 将去噪后数据进行快速傅里叶变换,观察功率谱分布情况,判断瞳孔尺寸振荡幅度;

(2) 对瞳孔尺寸进行统计学分析(SPSS10.0)。利用配对样本 T 检验分析试验组和对照组作业前后瞳孔直径的统计学差异。如果 $p < 0.05$,则被认为是各变量间具有显著性差异。

3 试验结果

3.1 瞳孔尺寸波动

控制虹膜的 2 种肌肉受神经元刺激变化,在稳定光照与警觉状态下,健康人的虹膜尺寸也会经历微小变化,0.5~1 s 内有 0.1~0.3 mm 的波动,振荡频率主要维持在 1 Hz 处^[10]。疲劳时人体瞳孔边缘不稳定,波动振幅增大。本试验中,试验组驾驶作业后瞳孔尺寸波动有一定幅度的增大,瞳孔直径有缩小趋势(图 4);对照组波动不明显而瞳孔直径有放大趋势(下页图 5)。为了更清楚地观察瞳孔尺寸波动幅度差异,将 65 s 数据进行快速傅里叶变换,信号转换为频域,观察功率谱分布情况。

瞳孔尺寸频域主要分布在 1 Hz 范围内,集中于 0~0.8 Hz。试验组作业后频谱能量为 21 728,与作业前的 14 730 相比有所上升,但与文献[11](作业前 721、作业后 2 264) 相比差别并不明显;对照组

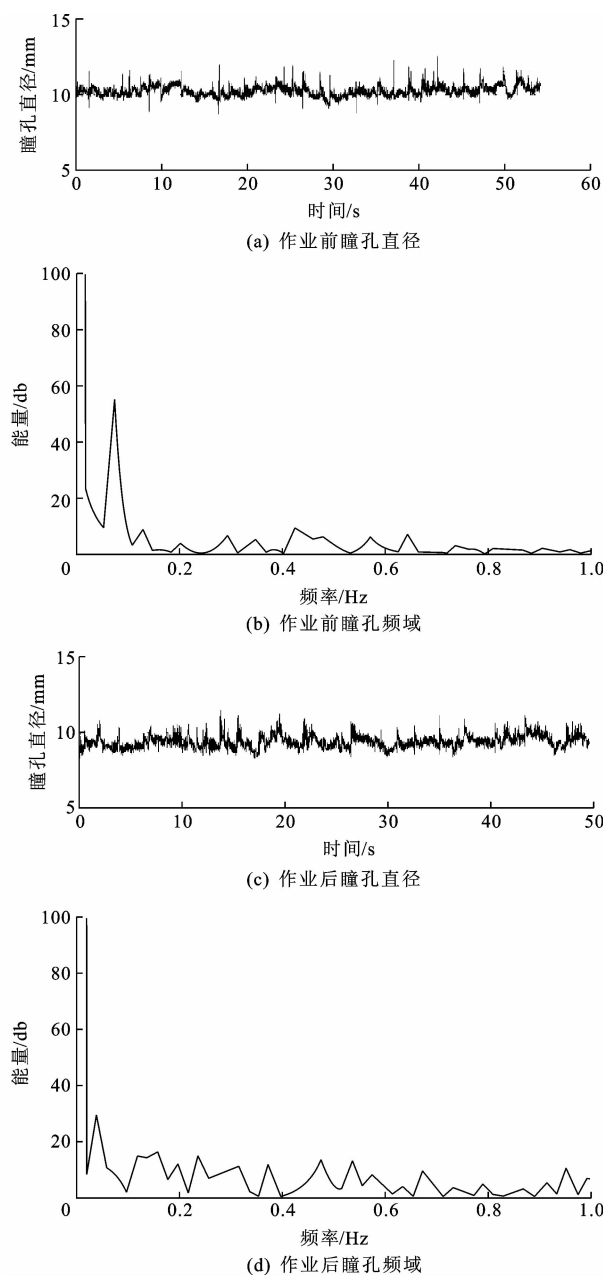


图 4 试验组被试 1 作业前后瞳孔直径与频域显示

Fig. 4 Pupillograms of subject 1 in task group before and after prescribed task period

作业后频谱能量为 11 391,比作业前的 11 598 略降低,变化较小。

3.2 瞳孔直径

试验组与对照组作业前后瞳孔尺寸数据见下页表 1(65 s 内均值)。驾驶作业后,试验组中 8 名驾驶人瞳孔直径均出现不同程度的缩小;对照组除 1 人瞳孔直径出现轻微缩小,其余 7 人出现不同程度放大。分别对 2 组人员作业前后瞳孔尺寸变化进行显著性分析(下页表 2、表 3),驾驶作业对试验组瞳孔影响变化显著($p < 0.05$);静态维修对瞳

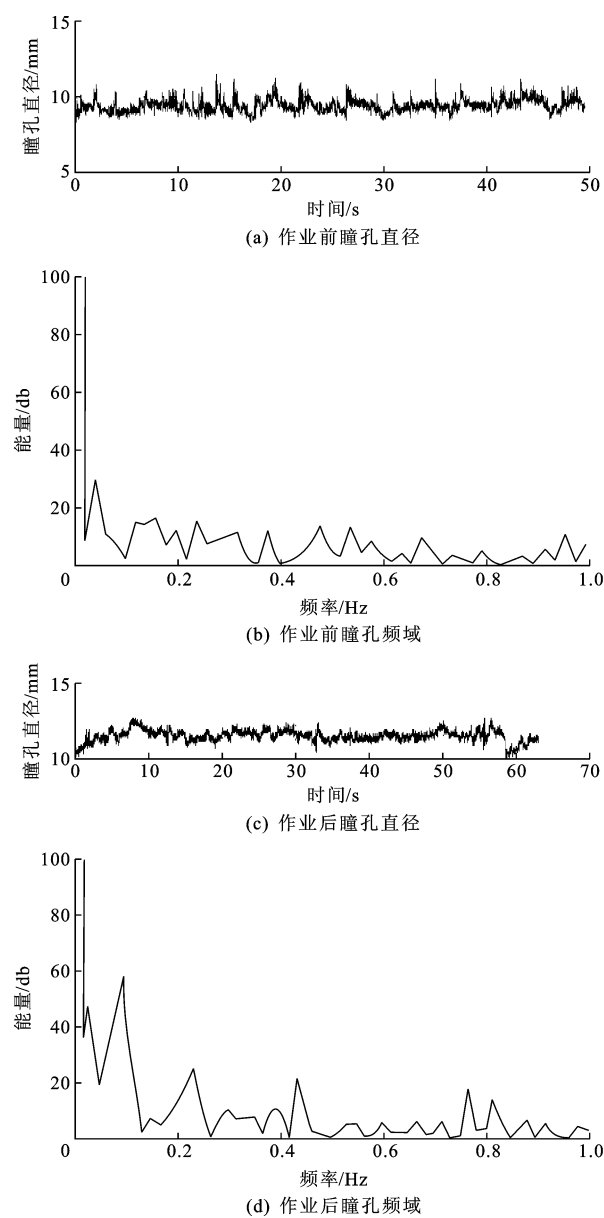


图5 对照组被试2作业前后瞳孔直径与频域显示
Fig. 5 Pupillograms of subject 2 in task group before and after prescribed task period

径变化影响不明显($p=0.06$)。

由下页图6能够看出,试验组驾驶作业结束后瞳孔尺寸显著缩小,缩小幅度为11.62%($p<0.05$);而对照组瞳孔尺寸出现放大,幅度为3.6%,相比试验组变化不明显($p=0.06$)。

试验组从事一定强度挖掘机驾驶作业后,瞳孔出现缩小现象;对照组从事检修工作瞳孔尺寸亦没有维持初始水平,出现放大趋势。因此强度差异较大的作业后,2组瞳孔尺寸出现明显差异。如果以瞳孔缩小代表疲劳理论解释试验组,该组试验人员出现疲劳症状,其主观自我评价亦显示试验人员自感疲劳。而对照组瞳孔出现放大现象则需要从生理学角度进行进一步解释。

3.3 试验结果讨论

人体疲劳并非从作业开始即随时间呈线性增长。作业进行一定时间,因肢体舒展、作业刺激身体神经引起兴奋,人的操作有效度、速度和准确度不是降低,而是有所提高^[18]。之后,作业能力随力源消耗而降低,疲劳加剧。试验中,对照组从事极低劳动强度的静态检修工作,测试时间内,试验者并没有进入“疲劳区”,而正处于作业“舒展区”(试验者主观自我评价证明,试验人并未有明显的疲劳感)。试验组则因从事较高强度作业(LG685为小型挖掘机,驾驶舒适性设计定位与用户体验反馈均处中低端),测试时间内,身体经由“作业舒展区”进入“疲劳区”,如下页图7所示。

在光照条件下,警戒状态人体的瞳孔边缘并没有如文献[15]无光照条件下保持较严格的稳定状态,而是有一定幅度的振荡,与疲劳状态下的特征有一定区分但不明显。这可能是因为光照对视神经产生刺激,控制虹膜的肌肉神经元产生兴奋,使得虹膜的微小变化振幅增大。

表1 试验前与试验后瞳孔直径

Tab. 1 Pupil diameter before and after prescribed task period mm

试验组			对照组		
样本号	试验前	试验后	样本号	试验前	试验后
1	12.82±0.55	10.35±0.50	1	11.30	14.99±1.10
2	13.79±0.70	10.90±0.30	2	11.60	14.54±1.20
3	9.52±0.60	8.96±0.30	3	10.25±0.45	10.70±0.50
4	10.38±0.05	9.33±0.55	4	10.16±0.50	10.26±0.55
5	10.60±0.10	8.90±0.35	5	9.94±0.40	13.28±0.25
6	11.54±0.60	11.35±0.50	6	9.48±0.55	12.90±0.30
7	11.18±0.65	11.16±0.40	7	11.44±0.65	13.58±0.90
8	13.73±0.40	11.77±0.25	8	11.50±0.20	10.96±0.35

表 2 试验组作业前后瞳孔直径变化显著性分析(配对样本 *T* 检验)

Tab. 2 Paired Samples test of task group before and after prescribed task period

参数	配对偏差					<i>t</i> 值	自由度	<i>p</i> 值 (双尾检验)
	平均值	标准差	平均数标准误差	偏差的 95%的置信区间				
				最低值	最高值			
组 1 作业前瞳孔直径- 作业后瞳孔直径	1. 268 6	1. 120 3	0. 423 4	0. 232 4	2. 304 7	2. 996	6	0. 024

表 3 对照组作业前后瞳孔直径变化显著性分析(配对样本 *T* 检验)

Tab. 3 Paired Samples test of control group before and after prescribed task period

参数	配对偏差					<i>t</i> 值	自由度	<i>p</i> 值 (双尾检验)
	平均值	标准差	平均数标准误差	偏差的 95%的置信区间				
				最低值	最高值			
组 2 作业前瞳孔直径- 作业后瞳孔直径	-1.355 0	1.991 0	0.629 6	-2.779 3	6.929×10^{-2}	-2.152	9	0.060

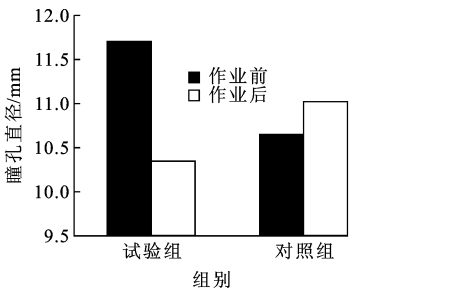


图 6 试验组与对照组作业前后瞳孔直径变化比较

Fig. 6 Comparison of pupil diameters between the task group and the control group

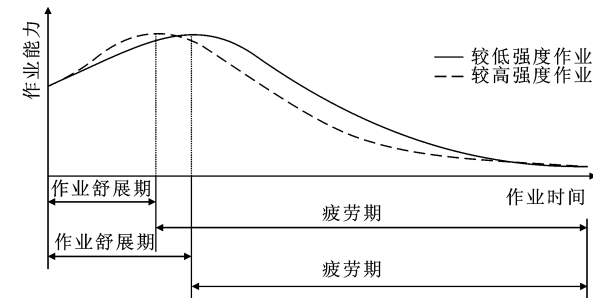


图 7 作业能力模拟曲线

Fig. 7 Operation ability simulation curves

4 结 语

(1)在瞳孔数据采集时给予稳定光照的情况下,瞳孔直径变化能够反映人体疲劳,瞳孔缩小与疲劳具有很强的关联性。

(2)在自然光照条件下,瞳孔边缘稳定性对疲劳的检测作用不明显。

(3)基于瞳孔法的疲劳检测可以在室内稳定光环境下进行,适用于车间作业;对于室外驾驶作业,瞳孔数据采集时具有恒定光照条件(阴天、光线不直射驾驶员脸部)亦可测量。

(4)本文使用眼动仪采集瞳孔数据,在瞳孔-疲劳理论的实践应用条件确立后,无作业中断的机器视觉能够完成瞳孔数据采集,实现疲劳检测的实时、无侵入要求。黑暗环境中瞳孔对疲劳的反应特征十分显著,但不代表光照条件下,瞳孔测量法无效。如果能够进一步确定瞳孔测量法对光照变化的适应程度,则瞳孔测量法具有可观的实用价值。

参考文献:

References:

[1] Li Z Y, Zhang M, Zhang X Y, et al. Assessment of cerebral oxygenation during prolonged simulated driving using near infrared spectroscopy; its implications for fatigue development[J]. European Journal of Applied Physiology, 2009, 107(3): 281-287.

[2] 马 勇,付 锐. 驾驶人视觉特性与行车安全研究进展[J]. 中国公路学报, 2015, 28(6): 82-94.

MA Yong, FU Rui. Research and development of drivers visual behavior and driving safety[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(6): 82-94. (in Chinese)

[3] 袁 伟,付 锐,郭应时,等. 基于视觉特性的驾驶人换道意图识别[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 132-138.

YUAN Wei, FU Rui, GUO Ying-shi, et al. Drivers' lane changing intention identification based on visual characteristics[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(4): 132-138. (in Chinese)

[4] 李增勇,焦 昆,陈 铭,等. 汽车驾驶员驾驶过程中的心率变异性功率谱分析[J]. 中国生物医学工程学报, 2003, 22(6): 574-576.

LI Zeng-yong, JIAO Kun, CHEN Ming, et al. Power spectrum analysis of heart rate variability of driver

- during simulated driving[J]. Chinese Journal of Bio-medical Engineering, 2003, 22(6): 574-576. (in Chinese)
- [5] 王炳浩, 魏建勤, 吴永红. 汽车驾驶员瞌睡状态脑电波特征的初步探索[J]. 汽车工程, 2004, 26(1): 70-72. WANG Bing-hao, WEI Jian-qin, WU Yong-hong. A preliminary investigation into the brain wave characters of car drivers at dozy state[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(1): 70-72. (in Chinese)
- [6] 刘志强, 汪 旸. 驾驶员疲劳监测方法设计[J]. 农业机械学报, 2006, 37(4): 26-29. LIU Zhi-qiang, WANG Yang. Drowsy driver detection system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4): 26-29. (in Chinese)
- [7] Harbluk J L, Noy I Y, Trbovich P, et al. An on-road assessment of cognitive distraction: impacts on driver's visual behavior and braking performance[J]. Accident Analysis and Prevention, 2007, 39(2): 372-379.
- [8] Dingus T A, Neale V L, Klauer S G, et al. The development of a naturalistic data collection system to perform critical incident analysis: an investigation of safety and fatigue issues in long-haul trucking[J]. Accident Analysis and Prevention, 2006, 38(6): 1127-1136.
- [9] Mitler M M, Miller J C. Methods of testing for sleepiness[J]. Behavioral Medicine, 1996, 21(4): 171-183.
- [10] Lowenstein O, Feinberg R, Loewenfeld I E. Pupillary movements during acute and chronic fatigue a new test for the objective evaluation of tiredness[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 1963, 2(2): 138-157.
- [11] Wilhelm B, Giedke H, Lüdtke H, et al. Daytime variations in central nervous system activation measured by a pupillographic sleepiness test [J]. Journal of Sleep Research, 2001, 10(1): 1-7.
- [12] 李 勇, 阴国恩, 陈燕丽. 阅读中疲劳、心理负荷因素对瞳孔大小的调节作用[J]. 心理与行为研究, 2004, 2(3): 545-548. LI Yong, YIN Guo-en, CHEN Yan-li. The regulating effect of fatigue and mental load on pupil size in text reading [J]. Studies of Psychology and Behavior, 2004, 2(3): 545-548. (in Chinese)
- [13] Szabadi E, Bradshaw C M. Autonomic pharmacology of α_2 -adrenoceptors[J]. Psychopharmacol, 1996, 10(3): 6-18.
- [14] Beatty J, Lucero-Wagoner B. The pupillary system [J]. Handbook of Psychophysiology, 2000(2): 142-162.
- [15] Lüdtke H, Wilhelm B, Adler M, et al. Mathematical procedures in data recording and processing of pupillary fatigue waves [J]. Vision Research, 1998, 38(19): 2889-2896.
- [16] Yu M Z, Kautz M A, Thomas M L, et al. Operational implications of varying ambient light levels and time-of-day effects on saccadic velocity and pupillary light reflex[J]. Ophthalmic and Physiological Optics, 2007, 27(2): 130-141.
- [17] Jamieson S. Likert scales: how to (ab) use them[J]. Medical Education, 2004, 38(12): 1217-1218.
- [18] 张华诚. 劳动强度与疲劳测定的心理参数分析[J]. 科技信息, 2008(22): 524-525. ZHANG Hua-cheng. Psychological parameters analysis of labor intensity and fatigue measurement [J]. Science & Technology Information, 2008(22): 524-525. (in Chinese)

(上接第 121 页)

- CHEN Da-wei. Study on planning and design theory for external passenger transport hub of metropolis [D]. Nanjing: Southeast University, 2006. (in Chinese)
- [9] 云 亮, 蒋阳升, 谢 寒. 铁路到达旅客离站交通方式选择模型研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2014, (3): 119-123. YUN Liang, JIANG Yang-sheng, XIE Han. Railway arriving passengers' off-site mode choice model research[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2014, (3): 119-123. (in Chinese)
- [10] 黎冬平. 出租车上客区规模的 Monte Carlo 仿真计算方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(18): 22-25. LI Dong-ping. Monte Carlo simulation calculation method for taxi boarding area scale[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(18): 22-25. (in Chinese)