

基于眼部行为的驾驶疲劳监测方法

潘晓东, 李君美

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为了克服 percentage of eyelid closure(PERCLOS)法作为疲劳监测方法对仪器要求过高的弱点,通过室外行车实验验证其实时监测的适用性的同时,在室内以眨眼次数和闭眼时间为主要实验分析研究对象,检验两者的数值与驾驶疲劳程度之间的关系以开发新的疲劳监测指标.通过实验分析结果论证 PERCLOS 实际应用的可能性,眨眼次数与闭眼时间作为驾驶疲劳眼部行为的评价指标的有效性和应用价值.

关键词: 驾驶疲劳; 疲劳监测; 眼部行为; 评价指标; 眼动仪

中图分类号: U 491.3

文献标识码: A

Eye State-based Fatigue Drive Monitoring Approach

PAN Xiaodong, LI Junxian

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Considering the percentage of eyelid closure (PERCLOS) method requires too much in equipment as a fatigue monitoring method, an out-of-door experiment was set to check out whether the PERCLOS method was feasible in real-time monitoring, and a laboratory measurement was set to test the availability of other eye states indices such as the frequency of blink and how long all blinks lasted, in order to find out more indices to monitor fatigue drive. Based on the results of the experiments, the possibility of using PERCLOS method in real-time is discussed and the relativity between the new indices and the degree of fatigue is validated.

Key words: fatigue drive; fatigue monitoring; eye state monitoring; indices; eye tracking system

为导致交通事故的重要原因之一.据统计,我国因疲劳驾车而造成的交通事故占总起数的 20% 左右,占特大交通事故的 40% 以上^[1].可见,减少疲劳驾驶对降低交通事故发生率有着重大的意义.而选定用以判断驾驶员疲劳状态的指标就显得尤为必要.

现阶段国内外的研究表明,疲劳与瞳孔直径、眼球转动、眼睑开合^[2-3]等行为有关,即眼部的某些行为能够反映人所处的精神状况.比较直观的是当人体处于疲劳状态时,眼睛闭合的频率及持续的时间都会有所变化.因此,可以通过监测眼睛的闭合状态即眼睑的活动情况来判定被试者的疲劳状态. PERCLOS (percentage of eyelid closure) 法就是使用眼睛闭合时间占特定时间的比率确定疲劳程度的,这里闭合是指瞳孔被眼睑遮住的状态.此方法有 P70、P80 和 EM 3 种判定标准,分别表示瞳孔被眼睑纵向遮住 70% 的时间比率、遮住 80% 的时间比率以及眼睑均方闭合率. PERCLOS 法被认为是现阶段对疲劳进行测定的最好方法,而 P80 则被验证为与疲劳相关性较好的标准^[4-5].但是 PERCLOS 法现阶段的实验大多仅限于室内进行,实验室内环境以及被试者心理都与实际驾驶状态有不小的差距.笔者结合行车实验进一步验证 PERCLOS 指标(P80)与驾驶疲劳的关系.同时考虑到监测的实用性,探讨眨眼次数、总闭眼时间等作为疲劳监测评价指标的可行性.

1 实验设计

1.1 实验目的

①验证 PERCLOS 法的实际应用效果;②总结出更易测得的指标,检验其与疲劳之间的相关性.

大多数的实验以室内实验为基础,将室外实验

因长时间驾驶或其他原因引起的驾驶疲劳已成

收稿日期: 2009-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(50878157); 浙江省交通科技项目(2009H10)

第一作者: 潘晓东(1960—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为道路交通安全与环境工程、交通工效学及应用技术、道路交通规划与设计等. E-mail: panxd3@163.com

作为验证室内实验结论的手段予以实施. 笔者前期的实验是基于 PERCLOS 法的原理进行的, 其测试方法、指标有效性、指标阈值等方面的研究已经颇为成熟, 可以省略室内实验的部分, 直接对其进行实际应用验证. 而后期的实验目的是验证预先选定指标的有效性, 是一个比较初步的研究阶段. 若直接采用室外实验不仅没有必要而且存在一定危险性, 故采用在室内实验的方法, 待实验指标确定、测定技术亦比较成熟时, 可以考虑进行行车测试.

1.2 实验原理及方法

对睡眠的趋向是疲劳的主要表征之一. 许多针对疲劳的测试如头部位置检测^[6]、斯坦福睡眠尺度表^[7]、脑电波测试^[8]等都是将疲劳与睡眠相互联系, 认为监测出被试者趋于睡眠状态则可说明被试者处于逐渐疲劳的状态. 笔者延续这一理念, 通过监测被试者是否困倦从而判断被试者的疲劳状态.

室外实验采用 P80 作为基于眼动的驾驶疲劳监测标准. 仪器选用日本 NAC 公司生产的 EMR8 型眼动系统, 该系统在驾驶员注视点与行车安全关系、逆光条件下交通标志的可视距离、隧道进出口视觉特性等研究中均得到有效应用.

实验过程中通过图像采集卡对瞳孔图像处理可以得到各时间点的瞳孔纵向开合程度 (即瞳孔直径), 进而可以求出任意时刻的 PERCLOS 值 P_{er} . 从而确定被试者的疲劳状态. 图 1 中 t_1, t_2, t_3 分别表示 3 次眨眼时瞳孔纵向张开不超过 20% 的时间.

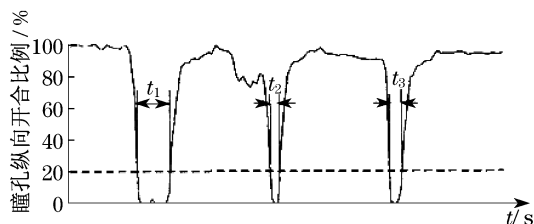


图 1 PERCLOS 值的求解原理

Fig.1 Principle of how to calculate the percentage of eyelid closure

设在连续的采样时段 T 内有 n 次闭眼, 且第 i 次闭眼瞳孔被眼睑遮住 80% 的时间为 t_i , 则 P_{er} 值可由下式求出: $P_{er} = \sum_{i=1}^n t_i / T$.

对于某一时刻, 可以根据在线及脱机监测 2 种情况选取. 对于在线监测, 选择测试点之前的时间段作为采样时段, 对于脱机监测, 选择测试点之前的 $T/2$ 时间段以及之后的 $T/2$ 时间段作为采样时段. T 的长短对疲劳判定的正确率有一定影响, 较长的

采样时间可以保证较高的正确率, 对于脱机监测, 值可以取大一些, 一般为 60 s, 而对于在线监测, 则因为有时性的要求可取小一些, 但是过小的采样时间会大幅降低正确率, 对某些被试者, 15 s 的采样时间会导致高达 24% 的错误率^[9], 因此, 在线监测时应根据实时性要求、被试者状况合理选择采样时间.

求得 P_{er} 后, 使用相应的 P_{er} 与疲劳状态的对应关系^[10]进行疲劳程度的评判, 即可得到任意时刻的疲劳状态.

室内实验以摄像机对被试者眼部行为进行观测. 结合被测者的脸部特征及实验员对被测者状态的实时记录判断被试者的疲劳状态, 提取不同状态的典型代表片段 30 s (摄像机画面 750 帧). 应用视频编辑软件 VirtualDub 对提取片段进行帧判别, 以每秒 25 帧的速度对眨眼次数和闭眼时间进行统计. 分别对被试者各个状态下单位时间内的眨眼次数和总闭眼时间进行对照分析.

对被试者录像进行典型片断的提取时, 尽可能大量提取每种状态下的典型片断. 如提取 3 组瞌睡状态下的典型片断, 取其眨眼特征均值作为此状态代表值, 来弥补个体样本数量的不足和提高可靠性.

1.3 实验制定

1.3.1 室外实验

本实验意在确定 PERCLOS 法能否在被试者处于清醒、可疑、瞌睡 3 种情况下都能有效实施, 尤其是与驾驶疲劳相关性极大的后 2 个阶段. 最接近现实的方法是让被试者坐在驾驶员的位置承担驾驶工作, 对其眼部行为进行观测, 但是这样做需要让驾驶员本身进入瞌睡状态, 危险性极大. 经过综合考虑, 采用让被试者坐在副驾驶席上接受测试的方法, 近似认为被试者的疲劳状态与驾驶员相似, 在安全性和真实性两者之间达到平衡.

室外实验选定在春季晴好天气下进行. 考虑实验结果的通用性, 以高速公路为主要实验道路类型. 选择浙江上三高速公路的非隧道段作为主要实验路段, 此路段路况良好, 线形设计符合要求, 限速 80~100 km·h⁻¹. 实验车辆采用桑塔纳 2 000 型.

初步选定 4 名被试者, 请其就坐后, 由有一定驾驶经验的驾驶员于基本不出现拥堵的时段在交通密度较小的路段上驾驶, 要求被试者始终注意驾驶路况, 允许被试者进入瞌睡状态. 实验结束后, 通过对数据的提取分析, 判断被试者状态, 以验证眼动仪在实时车载实验中的有效性.

1.3.2 室内实验

选择有午睡习惯在前一晚正常睡眠的青年学生共12名,其中男生10名,女生2名,年龄均为22~26岁之间。

选择青年学生实施驾驶疲劳实验有一定的弊端,因为这一群体可能无法代表驾驶员的疲劳特征。但室内实验以测定疲劳状态与预定指标的关系为研究对象,同样是以被试者经历由清醒到疲劳的各个阶段为主要要求,基本上,选择青年学生完成实验就可以满足要求。但是在证明总闭眼时间和眨眼次数与疲劳确实存在相关性之后,有必要引入驾驶员群体辅助完成实验,增加实验的可信度。

由于人的睡眠受人体生理节律的影响,一般来说,午夜到清晨之间和白天中午2个时间段是正常睡眠的人想打瞌睡的时间。午餐后均有疲劳感增加,加上有午睡习惯,容易出现疲劳瞌睡状态。因此,本实验测量时间选定为12:30~16:00^[11]。

将拍摄并挑选出来的行车录像资料通过投影仪在大屏幕上连续放映,每个测试过程为30 min。实验环境尽量模拟车内驾驶环境。被试者调整完毕后实验者开始播放行车录像。于此同时,将摄像机对准被试者眼部进行拍摄。另外,考虑到将主观监测方式和客观监测方式相结合的办法能够使实验收到更好的效果,将配备实验人员在现场对被试者的行为进行

人工记录,作为主观监测结果,以便对被试的行为作出更全面的分析。

2 实验结果的整理与分析

2.1 室外实验

利用眼动仪的自动分析系统对实验结果进行分析。图2即为不同疲劳状态下被试者的眼部图像,当人体处于疲劳状态时,眼睛的开合状态通常如图2b, 2c的情况。

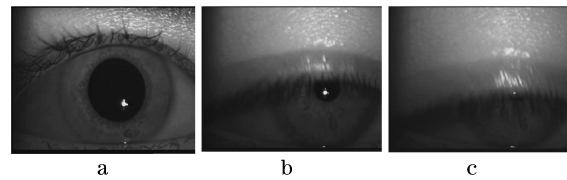


图2 不同疲劳状态下的眼睛

Fig.2 Images of eyes in different fatigue statuses

以实验中的2个样本数据为例,其瞳孔开合程度数据的统计结果片断如图3所示。由 P_{er} 的求解公式可得样本1的 P_{er} 为0.118,由 P_{er} 阈值标准可知被试者处于可疑状态;样本2的 P_{er} 为0.198,由 P_{er} 阈值标准可知被试者处于瞌睡状态。

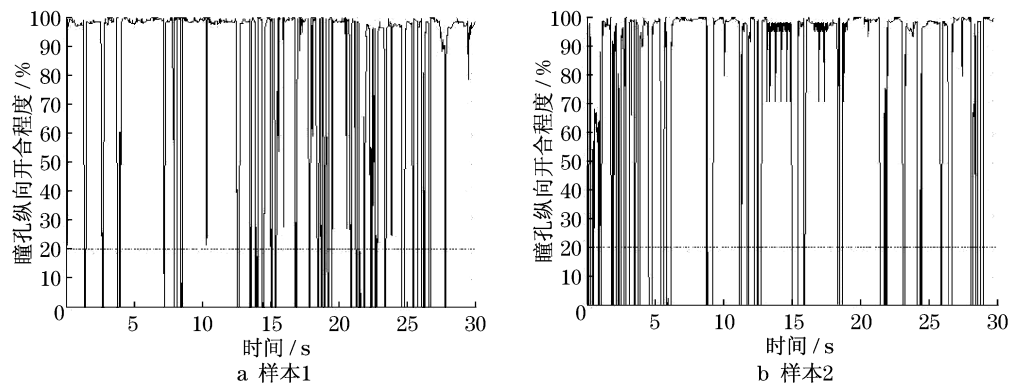


图3 30 s瞳孔纵向开合程度样本片断

Fig.3 Examples of the exposed pupil in vertical dimension in a sampling

2.2 室内实验

2.2.1 实验的预分析处理

室内实验对被试者的精神状态判断是由实验者主观确定的,相对于指标阈值已知的室外实验准确性不足,将被试者的疲劳状态仅用可疑和瞌睡2个等级来描述存在困难,故在此将被试者的精神状态划分为4个等级:清醒、安稳、瞌睡前、入睡。

室内实验的目的在于探索2个新引进指标与疲

劳之关系,所以对实验样本有一定的要求,需要预先确定有效实验样本的问题。

有效实验样本是指符合实验设计、能达到实验的预期要求、误差控制在可以接受的范围内实验数据可以利用的样本。在本实验中,其判别主要取决于被试者在实验过程中是否经历了各种状态以及仪器是否清楚地记录了这些状态的发生。如果整个过程被测者都精神抖擞或很兴奋、情绪较高,并未表现出

疲劳迹象,则不能达到研究状态变化的目的,视为无效实验样本.现将样本的有效性划分为 4 个水平,如表 1 所示.

表 1 样本有效性评级
Tab.1 Validity of the samples

有效性	清醒	安稳	瞌睡前	入睡前
很好	✓	✓	✓	✓
较好	✓	✓	✓	■
一般	✓	✓	■	×
差	✓	✓	×	×

注: ✓ 为有此状态出现; ■ 为疑似状态出现; × 为无此状态出现.

2.2.2 数据分析

几种状态下具体的眨眼特征数据提取如表 2,其中总闭眼时间和平均一次闭眼时间以图像的帧数计(30 s 图像含 750 帧).

表 2 3 个指标在不同状态下的测试数据
Tab.2 Data of the 3 indices in different statuses

状态	30 s 眨眼次数		总闭眼时间				平均一次闭眼时间	
	平均值/次	与正常状态时的差值/次	平均值/帧	占总时间比例/%	与正常状态时的差值/帧	是正常状态时的倍数	平均时间/帧	是正常状态时的倍数
正常	16		52	7			3	
安稳	13	- 3	60	8	8	1.15	7	2.33
瞌睡前	15	- 1	123	16	71	2.37	11	3.67
入睡前	6	- 10	387	52	335	7.44	154	51.30

(2) 4 种精神状态下总闭眼时间.由表 2 知,在不同的状态下,总闭眼时间平均值差异较大.安稳状态较正常状态下闭眼时间稍有增加,总闭眼时间所占总时间比例也稍有上升,由 7% 上升到 8%.随着进入瞌睡前状态,总闭眼时间快速增加,总闭眼时间的比例比安稳状态时增加 1 倍,达到 16%.且入睡程度越深,总闭眼时间越长,到本实验的入睡前阶段,闭眼占到一半以上的时间.这些数据符合正常的疲劳瞌睡前状态进程闭眼的变化规律.同样对不同疲劳状态下闭眼时间平均值进行 F 检验,得到显著性水平 α 为 0.000 1,差异显著.

(3) 平均一次闭眼时间.考虑到眨眼次数很可能因被试者的个人习惯而异,而眨眼次数多则闭眼时间必然长,故总闭眼时间在一定程度上也会受到眨眼次数的影响.为排除此类影响,可用总闭眼时间和眨眼次数求商得到的平均一次闭眼时间作为指标进行观察,获得更为显著的比较效果.由表 2 可见,在不同的状态下,平均一次闭眼时间差异很大.安稳状态下平均一次闭眼时间为正常状态时的 2.33 倍,

基于原始的实验数据,从各个状态下 3 个指标的平均值及各自与正常状态下的差别 2 个方面进行讨论分析.

(1) 4 种精神状态下眨眼次数.在不同的状态下,眨眼次数平均值有所差异.正常状态下眨眼次数较其余 3 种状态频繁,这符合常理.但从表中可以看到,瞌睡前状态下眨眼次数稍小于正常状态,却高于安稳状态,这有悖于预期的假设.总体看来,随着瞌睡程度的加深,到入睡前状态时,眨眼次数大幅度降低.通过其余 3 种状态与正常状态的比较,即与正常状态时的眨眼次数平均值差值的分析更加说明了此过程的变化.采用软件 Origin7.5 应用方差分析(ANOVA)对不同疲劳状态之间眨眼次数进行 F 检验,统计发现不同疲劳状态下眨眼次数平均值差异显著,显著性水平 α 为 0.010 2.

随着进入瞌睡前状态,闭眼时间逐渐增加,为正常状态下的 3.67 倍,而到入睡前状态时,增加就更加显著,增幅倍数为 51.30 倍.统计发现不同疲劳状态下平均一次闭眼时间差异显著性水平 α 为 0.000 2,差异显著.

3 结论与讨论

3.1 实验结论

室外实验不仅再次验证了 PERCLOS 法的 P80 指标与疲劳的相关性,更充分说明了这种方法在实时观测中也能起到良好的效果,能区分被试者的疲劳状态.即 PERCLOS 法在车载实验中依然行之有效.一旦将来改进实验仪器,以非接触式的实验方式替代如今的眼动仪接触式实验测试 PERCLOS 值,这种方法将有更好的应用前景.

通过上述对室内实验诸多数据的分析,关于新引进的 2 个评价指标可以得出以下几条结论:

(1) 眨眼次数随状态不同而变化的规律性不太

强.主要表现为瞌睡前状态下眨眼次数的增加,但随着进入入睡前状态,眨眼次数大幅降低.造成上述结果的原因,一方面是由于本实验样本数据有限,另一方面可能是被试者在刚开始进入瞌睡前状态时,精神较为紧张(考虑到驾驶的现状),在入睡与清醒之间挣扎,想睡而不敢睡,稍微清醒眼睛就睁开,但睁眼持续时间明显低于正常状态,且此时视觉效果及功能也明显降低.

(2) 随着瞌睡前瞌睡程度的加深,总闭眼时间逐渐增加.

(3) 平均一次闭眼时间这个指标综合反映了眨眼次数和总闭眼时间这2个指标的变化,此指标值随状态不同而变化的规律性较强,随着瞌睡前瞌睡程度的加深,平均一次闭眼时间显著延长.

3.2 讨论与总结

随着计算机应用的普及,PERCLOS法以其精确性和易操作性可成为判断驾驶疲劳的主要指标,从而带动其他眼部行为在疲劳监测方面的应用.经验证,PERCLOS法在实时行车实验上依然具备良好有效性.但本室外实验是在一定自然条件和路段条件下实施的,结果可能受到限制,其他道路或环境条件下PERCLOS法的适用性尚需进一步研究.

经过验证,单位时间内的眨眼次数和总闭眼时间可作为眼部行为指标以评价被试者疲劳水平.由于这2个指标均与被试者疲劳状态下的生理反应有直接关系,所以由2个指标经过计算得到的平均一次闭眼时间指标相对更加准确,可以考虑进一步对其进行深入研究,探讨其实用性.

另外,作为疲劳评价研究的初步探索,本实验目的是确定指标的适用性,即能否有效地测定被试者的疲劳状态.今后将采用大量样本的实验确定以此指标判断疲劳状态的具体阈值,同时有必要选用有驾驶经验的被试者,使测得的评价阈值更有实效性.

参考文献:

- [1] 陈勇,黄琦,刘霞,等.一种全天候驾驶员疲劳检测方法研究[J].仪器仪表学报,2009,30(3):636.
CHEN Yong, HUANG Qi, LIU Xia, et al. All-weather detection method of driver fatigue[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(3): 636.
- [2] 杜志刚,潘晓东,郭雪斌.高速公路隧道进出口视觉适应实验[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(12):1998.
DU Zhigang, PAN Xiaodong, GUO Xuebin. Experimental studies of visual adaptation during freeway tunnel's entrance

- and exit[J]. Journal of Harbin Institute of Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(12): 1998.
- [3] 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.
PAN Xiaodong, SONG Yongchao, YANG Zhen, et al. Visual environment improving scope at entrance and exit of highway tunnel based on visual load [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(6):777.
- [4] Anneke Heitmann, Rainer Guttkuhn, Acacia Aguirre, et al. Technologies for the monitoring and prevention of driver fatigue[C]// A Proceeding of the First International Driving Symposium on Human Factor in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, Iowa: University of Iowa. Public Policy Center,2001:81-86.
- [5] 王荣本,郭克友,储江伟,等.适用驾驶员疲劳状态监测的人眼定位方法研究[J].公路交通科技,2003,20(5):111.
WANG Rongben, GUO Keyou, CHU Jiangwei, et al. Study on the eye location method in driver fatigue state surveillance [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(5):111.
- [6] 周玉彬,俞梦孙.疲劳驾驶检测方法的研究[J].医疗卫生装备,2003,24(6):25.
ZHOU Yubin, YU Mengsun. Research on method of detecting drowsy driver [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2003, 24(6):25.
- [7] 郑培,宋正河,周一鸣.机动车驾驶员驾驶疲劳测评方法的研究状况及发展趋势[J].中国农业大学学报,2001,6(6):101.
ZHENG Pei, SONG Zhenghe, ZHOU Yiming. Study situation and developing trend on detecting and evaluating techniques of motor driver fatigue [J]. Journal of China Agricultural University, 2001, 6(6):101.
- [8] 颜松,魏建勤,吴永红.汽车驾驶员瞌睡状态脑电波特征提取的研究[J].中国生物医学工程学报,2005,24(1):110.
YAN Song, WEI Jianqin, WU Yonghong. Study of EEG features extraction for doze car drivers [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2005, 24(1):110.
- [9] 于兴玲,王民,张立材.驾驶员眼睛疲劳状态监测技术研究[J].传感器与微系统,2007,26(7):16.
YU Xingling, WANG Min, ZHANG Licai. Study on driver's eye fatigue state detection technique [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(7): 16.
- [10] Hayami T, Matsunaga K, Shidoji K, et al. Detecting drowsiness while driving by measuring eye movement a pilot study [C]//The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems Proceedings. New York: IEEE,2002:156-161.
- [11] 殷艳红.基于脑电波与眨眼的驾驶员疲劳模拟实验研究[D].上海:同济大学交通运输工程学院,2008.
YIN Yanhong. Research on driver's fatigue state based on analyzing EEG and eye blink in stimulated driving environment [D]. Shanghai: Tongji University. College of Traffic and Transportation Engineering,2008.