

基于眼部行为的驾驶疲劳评价指标的阈值

潘晓东¹, 李君美¹, 徐小冬²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 苏州市市政工程设计院, 江苏 苏州 215007)

摘要: 为将时段内眨眼次数、闭眼总持续时间和眨眼时间均值3类眼部行为指标应用于实际驾驶疲劳监测, 进行了含173个样本的实验研究. 将实验对象根据年龄、性别分类, 以脑电指标为参照, 得到各类人群在不同疲劳程度下3个眼动指标的阈值. 从显著性、稳定性两个方面对3个指标进行论证分析, 确定眨眼时间均值是三者中较优的指标, 且验证了以年龄对人群进行划分更为合理. 最后结合样本的数据, 针对不同年龄人群给出3种觉醒状态下平均一次眨眼指标的阈值, 通过室外车载实验验证了阈值的有效性.

关键词: 驾驶疲劳; 疲劳监测; 眼部行为; 评价指标; 指标阈值

中图分类号: U 491.3

文献标识码: A

Threshold Value of Indices of Eye States to Monitor Drive Fatigue

PAN Xiaodong¹, LI Junxian¹, XU Xiaodong²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Suzhou Municipal Engineering Design Institute Co., Ltd., Suzhou 215007, China)

Abstract: In order to put eye states indices such as the frequency of blink, how long all blinks have taken, the average time of blink into practice to monitor drive fatigue, an experiment with 173 samples was set out. On the basis of classifying samples by age and sexuality, the threshold values of these three indices were calculated with the reference to EGG index. The three indices were investigated from two aspects, namely, significance of difference and stability, and then the average of blink time is regarded as the most appropriate index. Classifying people by the age is more reasonable. In the light of the data, the threshold values of this index of every crowd with different ages were figured out, and

their practicality in real-time monitoring was verified in real-time monitoring through an out-of-door experiment.

Key words: drive fatigue; fatigue monitoring; eye state monitoring; evaluation indices; threshold values of indices

疲劳驾驶是交通事故产生的重要原因之一. 现阶段针对疲劳驾驶的研究重点在于如何监测和评定驾驶员的疲劳状态. 发展得比较成熟的监测方式如脑电观测和PERCLOS法虽然已被验证有效^[1]并有相应的阈值^[2], 但这两种方法仍存在以下不足: 首先, 两者均需要比较复杂的仪器作为测试手段, 在实际应用中很难普及; 其次, 两者均属于接触式测试, 在驾驶员接受测试时需要在头部以及身体其他部位佩戴相应仪器, 会影响测试的效果. 开发新的指标并确定其在各疲劳程度下的阈值非常必要. 国内外的研究表明, 瞳孔直径、眼球转动、眼睑开合等眼部行为都与疲劳相关. 作为眼部行为指标的代表, 时段内眨眼次数、闭眼总持续时间和眨眼时间平均值也可以验证疲劳程度^[3-5], 且其测试方法克服了上述两个不足.

1 实验设计

目前眼部行为与疲劳的关系已经被定性地证明^[4], 但尚缺乏定量的探讨. 为使对驾驶疲劳的研究有更好的连续性, 本文实验将沿袭以往观测驾驶员眼部行为的实验方法^[4], 扩大样本数量, 以得到各类人群的眼部行为指标在不同疲劳程度下的阈值.

1.1 实验原理

疲劳总是体现在对睡眠的趋向上, 可以从人的

收稿日期: 2010-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(50878157); 湖南交通科技进步与创新计划(200821); 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. E-mail: pxd3@163.com

通讯作者: 李君美(1987—), 女, 硕士生, 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. E-mail: amoyahoo@126.com

觉醒状态判断其疲劳程度. 而脑电波中慢 α 波对人体疲劳非常敏感^[5], 对应不同的觉醒状态, 慢 α 波的能量有显著差别^[3,5]. 可借助慢 α 波数据的分析判断被试者在相应的时间段处于何种觉醒状态以及是否疲劳, 该方法已在实验中被认定有效^[4]. 本研究以此为参照, 判断各时间段内被试者的觉醒状态, 再提取出这一状态下最具典型性的 10 s, 观察这 10 s 内相对应的眼部行为的 3 个指标, 从而总结在此疲劳阶段中眼部行为各个指标的阈值.

无论是脑电波还是眼部行为的观测, 均属于客观观测. 本研究同时引入主观监测技术, 实验过程中, 由实验人员负责人工记录被试者所处的状态并给出评价, 以发现更多问题.

1.2 实验设备

本实验所用仪器为日本株式会社脑力开发研究所(Brain Function Research Center)生产的脑电波仪(mental & spiritual electronics)、两台电脑、一幅白色投影屏幕、一台投影仪和一台摄像机.

脑电波测量仪的主要功能为获取被测者的脑电波信息. 脑电数据的记录和分析可依靠脑电波实验分析软件实现从而得到脑电波波形、脑电波各个频率下的电压、各个波段的强度等资料. 摄像机用于对准被试者脸部拍摄, 以记录其眼部行为, 用于后续分析. 另外, 本实验选用由 FORUM 公司研发的 UC-win/Road 道路环境模拟软件制作一段时长为 30 min 的仿真行车录像, 通过投影仪在投影屏幕上播放.

1.3 实验过程

人体处于何种疲劳状态与外界环境有密切关系, 故对实验条件有比较高的要求. 本实验选择在对驾驶安全较为不利的高温环境下进行, 室内实验部

分对温度进行了控制. 研究的所有样本在 6 月到 9 月之间陆续完成, 实验过程中室内温度维持在 25~35 ℃ 之间.

实验的目的是要监测被试者在各种疲劳状态下的指标值, 故需要被试者在实验过程中经历清醒、临界、疲劳 3 种觉醒状态^[6]. 一般来说, 白天中午是有正常睡眠习惯的人容易感觉疲劳的时间, 且午餐后疲劳感会进一步增强, 因此, 实验测量时间定为 12:30—16:00. 另外, 再有意选择一些有午睡习惯的被试者, 则更易全面地观测到这 3 种状态.

将投影屏幕位于被测者的正前方, 距被测者 2 m, 调整座椅高度与屏幕下部相平并尽量模拟车内驾驶环境. 实验时被试者头戴脑电波测量接触电极带, 经过 1~2 min 的试用和放松后, 由实验者开始播放行车录像, 此时要求被试者精神放松, 想象在驾驶车辆, 前面的行车录像就是自己所看到的前方路况. 实验过程中, 录像机持续对被试者眼部行为进行观测记录.

实验人员除负责应对实验现场状况外, 需以个人角度观察被试者行为以供对照. 另外还应制作表格对被试者的基本状况(年龄、性别等)以及实验过程中的状态等进行调查, 获取辅助信息.

2 实验结果及其分析

2.1 样本有效性

本实验被试者为 173 人, 其中部分被试者数据因脑电波数据在消噪阶段不收敛或存在明显的数据异常被舍弃, 最终有效样本数为 157 个. 为获取不同人群的相应指标阈值, 将各有效样本按照性别、年龄等特点进行分类统计, 见表 1.

表 1 不同分类标准的样本数
Tab.1 The amounts of samples from different categories

分类	男	女	<20 岁	20~29 岁	30~39 岁	40~49 岁	50~59 岁	60~69 岁
样本数量/个	99	58	28	66	17	24	17	5

2.2 3 个指标的均值

对分组结果分别计算, 得到各类人群的 3 个指标值.

按照性别与年龄将人群分类统计结果列于表 2. 由表 2 可见, 对于各类人群, 均有随着疲劳程度的加深, 闭眼总持续时间和眨眼时间均值明显增大的趋势; 而时段内眨眼次数随着觉醒状态变化变动的趋势则不太稳定, 有一些群组时段内眨眼次数随

着疲劳程度的加深逐渐减少, 有一些则是在临界状态出现时段内眨眼次数的最大值, 没有明显的规律可循.

时段内眨眼次数属于个人习惯的范畴, 其值的大小在一定程度上因人而异, 作为评价指标可靠性不足. 故以下讨论排除此指标, 仅对闭眼总持续时间和眨眼时间均值进行比较.

表 2 不同性别、年龄人群 3 种状态下各项指标的均值
Tab.2 The average of each index of samples from different categories

分类	时段内眨眼次数/次			闭眼总持续时间/s			眨眼时间均值/s		
	清醒	临界	疲劳	清醒	临界	疲劳	清醒	临界	疲劳
男	4.990	5.495	4.828	0.895	1.961	2.725	0.181	0.359	0.564
女	5.138	5.327	5.103	0.951	1.903	2.826	0.188	0.363	0.558
<20 岁	4.861	5.667	4.972	0.823	1.944	2.719	0.167	0.346	0.547
20~29 岁	5.746	5.576	5.034	1.037	1.951	2.789	0.181	0.356	0.557
30~39 岁	3.222	4.167	4.333	0.617	1.536	2.481	0.201	0.377	0.575
40~49 岁	4.880	5.880	5.320	0.962	2.229	3.064	0.199	0.376	0.576
50~59 岁	5.429	5.214	4.786	0.951	1.874	2.729	0.178	0.362	0.564
≥60 岁	4.400	5.000	4.000	0.896	1.952	2.368	0.201	0.386	0.588

2.3 稳定性验证

考虑到需要比较的两个指标其平均值和单位有所不同,故采用变异系数代替标准差检验两者的稳定程度.一般认为变异系数较小的指标离散程度也较小,以其作为标准更加可靠.

分别以性别、年龄为划分依据,计算各类人群两类指标的变异系数如表 3 所示,其中 C_{V_1} , C_{V_2} 分别代表了闭眼总持续时间、眨眼时间均值的离散系数.

表 3 不同性别、年龄人群 3 种状态下各项指标的变异系数

Tab.3 The coefficient of variation of each index of samples from different categories

分类	清醒		临界		疲劳	
	C_{V_1}	C_{V_2}	C_{V_1}	C_{V_2}	C_{V_1}	C_{V_2}
男	0.563	0.204	0.412	0.126	0.441	0.094
女	0.502	0.210	0.438	0.122	0.362	0.136
<20 岁	0.511	0.179	0.402	0.104	0.387	0.072
20~29 岁	0.456	0.183	0.417	0.126	0.397	0.128
30~39 岁	0.689	0.237	0.497	0.192	0.390	0.153
40~49 岁	0.606	0.206	0.410	0.081	0.420	0.083
50~59 岁	0.518	0.236	0.382	0.099	0.519	0.101
≥60 岁	0.696	0.171	0.402	0.064	0.484	0.047

通过以上对比,可以得到以下结论:

(1) 从纵向对比看出,不论以何种依据将人群划分,或者被试者被划分为哪一种人群,在各个觉醒状态下,与闭眼总持续时间指标相比,眨眼时间均值的离散系数 C_{V_2} 都相对更小.可见,作为监测驾驶疲劳的指标,单位时间内眨眼时间均值在各种觉醒状态下都最为稳定,并且对各类人群均适用.

(2) 从横向对比看出,不论是哪一种人群,眨眼时间均值的变异系数随着清醒—临界—疲劳这一过程的推进呈现逐渐减小的趋势,说明随着疲劳程度

的加深,单位时间内眨眼时间均值越来越稳定.但闭眼总持续时间的变异系数随着觉醒状态的转变,其值变化的规律性则不是非常明显.这是因为闭眼总持续时间在一定程度上与时段内眨眼次数相关,时段内眨眼次数多闭眼总持续时间必然长.由于时段内眨眼次数和被试者个人习惯有关,闭眼总持续时间的可靠性也会因此而下降.

(3) 相比之下,各类人群的眨眼时间均值都具有一定特点.以性别为分类依据,除了临界状态值外,男性眨眼时间均值的稳定性要大于女性,在疲劳状态下尤其如此.但闭眼总持续时间没有明显的规律,不同状态下,男性和女性的闭眼总持续时间指标是不固定的.

(4) 以年龄为分类依据进行对比可见,≥60 岁的群体其各个状态下的眨眼时间均值均最稳定,而 30~40 岁年龄段的群体此指标值较不稳定.

2.4 显著性分析

在本研究中,对正常、临界、疲劳 3 种状态下的数据进行方差检验,进而对其进行显著性分析.令

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$$
,其中 S_1 , S_2 分别表示用于对比的两个状态

下相应指标的样本方差.方差检验分析结果见表 4.

表 4 样本总体在 3 种状态下的两个指标方差的显著性检验

Tab.4 The results of significant test of variance for two indices in three statuses of the sample population

F 值	闭眼总持续时间/s	眨眼时间均值/s
正常—临界	0.365	0.713
正常—疲劳	0.188	0.734
临界—疲劳	2.737	1.403

在置信水平为 $\alpha = 0.005$ 时,可以认为 3 种状态

下的眨眼时间均值满足方差相等,闭眼总持续时间 验,如表 5 所示.
则不满足. 故仅对眨眼时间均值做平均值显著性检

表 5 不同性别、年龄人群的眨眼时间均值指标显著性检验
Tab.5 The results of significant test for blink duration of samples from different categories

状态	显著性检验							
	男	女	<20 岁	20~29 岁	30~39 岁	40~49 岁	50~59 岁	≥60 岁
清醒—临界	9.644×10^{-34}	3.821×10^{-20}	3.021×10^{-13}	8.914×10^{-21}	8.469×10^{-7}	1.485×10^{-9}	7.404×10^{-6}	7.900×10^{-2}
清醒—疲劳	5.342×10^{-34}	1.602×10^{-20}	3.009×10^{-13}	7.513×10^{-21}	3.101×10^{-7}	1.399×10^{-9}	7.425×10^{-6}	7.900×10^{-2}
临界—疲劳	6.562×10^{-33}	5.931×10^{-20}	3.016×10^{-13}	2.103×10^{-20}	4.695×10^{-6}	1.400×10^{-9}	7.446×10^{-6}	7.900×10^{-2}

由表 5 可见,除了年龄≥60 岁的人群,其他样本在置信水平 $\alpha = 0.005$ 上,3 种状态下眨眼时间均值有显著的差别,即用眨眼时间均值作为疲劳的监测指标可以分辨不同的觉醒状态. 年龄≥60 的人群之所以未能达到显著性要求,可能与样本总体中此年龄段的样本数较少有关系. 鉴于研究目的是确定驾驶活动中不同觉醒状态相对的指标阈值,而我国驾驶员年龄大于 60 岁的仍在少数,所以认为只要 60 岁以下的的数据达到了显著性要求即可.

经过指标与疲劳关系评价,稳定性、显著性检验,可见在最初设定的 3 个监测指标中,时段内眨眼次数与疲劳程度关系不明显,而闭眼总持续时间在一定程度上也受到它的影响,稳定性不佳,显著性也不及眨眼时间均值. 而眨眼时间均值不仅稳定性最好,显著性也令人满意,可以作为驾驶疲劳的监测指标.

2.5 阈值的确定

确定了眨眼时间均值的有效性之后,可以计算出置信水平 $\alpha = 0.05$ 的置信区间,从而可以更准确地描述 3 种状态下的眨眼时间均值阈值.

各类人群样本中,男性的样本数多达 99 个,可以用以判断眨眼时间均值的分布类型.

对男性样本的 3 组数据进行偏度和峰度联合检验,在置信水平 $\alpha = 0.05$ 下,3 种状态下的眨眼时间均值数据均符合正态分布. 可以认为其余各类人群各个状态下的数据在样本数量足够大的时候,均符合正态分布. 表 6 为各类人群的 3 种状态眨眼时间均值指标在置信水平 $\alpha = 0.05$ 时的置信上、下限.

由表 6 可见,男性和女性在 3 种觉醒状态下眨眼时间均值的置信上、下限差别不明显,这使得对人群的类别划分失去了意义. 而以年龄为划分依据,得到不同年龄人群在 3 种觉醒状态下这一指标的差别较大,较好地体现出不同种类的人群的生理特征,可见以后者作为人群划分标准更加合理而全面.

表 6 不同性别、年龄人群 3 种状态下眨眼时间均值的 0.05 置信区间

Tab.6 The 95% confidence intervals of blink duration for samples from different categories

分类	清醒眨眼时间均值/s		临界眨眼时间均值/s		疲劳眨眼时间均值/s	
	置信下限	置信上限	置信下限	置信上限	置信下限	置信上限
男性	0.177	0.188	0.350	0.368	0.553	0.574
女性	0.177	0.198	0.352	0.375	0.538	0.578
<20 岁	0.157	0.178	0.334	0.358	0.534	0.561
20~29 岁	0.173	0.190	0.344	0.368	0.538	0.575
30~39 岁	0.177	0.224	0.341	0.413	0.531	0.619
40~49 岁	0.182	0.216	0.364	0.389	0.557	0.596
50~59 岁	0.154	0.202	0.341	0.382	0.531	0.597
≥60 岁	0.158	0.244	0.355	0.417	0.554	0.623

3 实验结果验证

以上实验均在室内进行,被试者在心理和生理状态上都与实时驾驶时存在差异,指标在车载实验中的有效性是不确定的. 为了对上述阈值在实际车载实验中的有效性进行验证,尚进行了室外实验.

3.1 实验方法

由于要求被试者在实验过程中尽量接近疲劳状态,实验存在着一定的危险性;室外实验是验证性实验,无需过大的样本量,故室外实验部分选择了 4 名有丰富驾驶经验的被试者.

实验于春季天气晴好时进行,实验路段主要为上海 A20 公路,视距良好.

在实验过程中,由被试者驾驶车辆,在被试者的头部配戴脑电仪,由车载计算机实时记录脑电数据,并以摄像机对准其眼部进行拍摄,以获得眼部行为数据. 数据分析沿袭室内实验的做法,对眨眼时间均值进行计算,将其与室内实验的统计结果对比讨论.

3.2 实验结果分析

4 名不同年龄段被试者测试数据如表 7 所示。
在实际行车中,只要监测到驾驶员处于临界状态就可以给出警告,只要清醒和临界状态的实测数据满足要求即可.可见,眨眼时间均值作为判断驾驶员觉醒状态、认定驾驶疲劳是否发生的指标的有效性令人满意.

但是,仍不排除部分驾驶员生理特征比较特殊的情况(如表 7 中后两个被试者,其眨眼时间均值在清醒状态下小于表 6 所示对应年龄段的特征下限,但根据眨眼时间均值随着疲倦程度的加深其值增大的特征,可以判断出被试者此时是清醒的).对于这部分人群,可以考虑在今后研究比较成熟的时候加以深入探索,对实验结论进行补充.

表 7 室外实验被试者数据
Tab.7 The results of outdoor experiment

被试者年龄范围/岁	30~39		40~49		20~29		40~49	
脑电指示的觉醒状态	清醒	临界	清醒	临界	清醒	清醒	清醒	临界
眨眼时间均值/s	0.183	0.401	0.192	0.390	0.136	0.173	0.173	0.364
眼部行为指示的觉醒状态	清醒	临界	清醒	接近临界	接近清醒	接近清醒	接近清醒	临界
符合程度	符合	符合	符合	基本符合	基本符合	基本符合	基本符合	符合

4 结论

(1) 作为用眼部行为评定觉醒状态的指标,眨眼时间均值无论在与疲劳程度的相关性、稳定性和显著性方面均优于其他两个指标,可以用作观测驾驶员觉醒状态的评定标准。
(2) 用眨眼时间均值观测驾驶疲劳时,以年龄将被试者分组更加全面且合理。
非接触式的测试驾驶疲劳的方式应用前景很广阔,但现有的研究尚不够成熟.现阶段给出的评价驾驶觉醒状态的阈值是基于 157 个有效样本给出的,样本总量基本可以令人满意.考虑到处于 20~29,30~39,40~49 岁等年龄段驾驶员数量较多,对于这些群体可以适当增加样本,使结果更加准确.此外,对于事故多发驾驶员群体,如货运驾驶员、驾龄较小的驾驶员,可以进行针对性测试,也可以考虑在不同温度条件下展开实验,发现更多规律.

参考文献:

[1] David Sommer, Martin Golz, Trutschel U,et al. Assessing

driver’s hypovigilance from biosignals [C] // 4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering,2009,22:152 – 159.
[2] Portouli E, Bekiaris E, Papakostopoulos V, et al. On-road experiment for collecting driving behavioural data of sleepy drivers [J]. Somnologie-Schlafforschung und Schlafmedizin, 2007,11(4):259.
[3] 徐小冬. 基于脑电分析的驾驶疲劳实验研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院,2009.
XU Xiaodong. Experimental research on driving fatigue based on EEG analyzing [D]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering,2009.
[4] 潘晓东,李君羨. 基于眼部行为的驾驶疲劳监测方法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2011,39(2):235.
PAN Xiaodong, LI Junxian. An approaching of fatigue drive monitoring based on eye state[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2011,39(2):235.
[5] 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 Transportation Engineering,2008.