

基于驾驶模拟的疲劳识别与车载 预警设备有效性研究*

王雪松[▲] 胥 川

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室 上海 201804)

摘 要 疲劳检测是车载疲劳预警设备的关键技术。研究开发了考虑生理和驾驶行为特征的疲劳预警设备,并通过驾驶模拟实验测试了该设备的有效性。结果发现:严重疲劳报警率、总报警率与 KSS 正相关,一般疲劳报警率在 KSS 小于等于 8 时,随 KSS 的升高而升高,KSS 由 8 变为 9 时,一般疲劳报警率降低,严重疲劳报警率大幅升高。KSS 在 7 级以下的报警率为 0;当 KSS 为 8 级时,总报警率的平均值为 0.45;当 KSS 为 9 时,严重疲劳报警率高于一般疲劳报警率,且总报警率在 0.85 以上。该报警设备对 KSS 为 9 级有效性最高。

关键词 驾驶模拟;疲劳驾驶;预警;有效性

中图分类号:U491.3 文献标志码:A doi:10.3963/j.issn 1674-4861.2014.05.015

Fatigue Detection and In-vehicle Fatigue Warning Device Based on Driving Simulator

WANG Xuesong XU Chuan

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

Abstract: Fatigue detection is the core technology of fatigue warning device. This study developed a fatigue warning device based on a set of both physiological and driving behavioral characteristics. Experiments over a driving simulator are conducted to test the effectiveness of warning devices. The results show that the warning rate of serious fatigue (WRSF) and total warning rate (TWR) are positively correlated with KSS. The warning rate of moderate fatigue (WRMF) also has a positive relationship with KSS, when KSS is below 8. When KSS changes from 8 to 9, the WRSF decreases, and WRSF increases dramatically. When KSS is below 7, the TWR is 0; when KSS is 8, the average of TWR is 0.45; When KSS is 9, the WRSF is higher than the WRF, and the TWR is above 0.85. The effectiveness of the fatigue device is the highest, when KSS is 9.

Key words: driving simulation; drowsy driving; warning; effectiveness

0 引 言

疲劳驾驶是造成严重交通事故的重要原因,由于疲劳驾驶行为而导致的重大交通事故数占到了 20%^[1]。2008 年,我国直接由疲劳驾驶造成事故 2 568 起,死亡人数 1 353 人,平均每起直接由疲劳驾驶引起的事故造成约 0.53 人死亡^[2]。美国交通部针对商用车辆的报告中指出,20%~

40%的商用车辆交通事故是由于疲劳驾驶导致^[3]。在纽约 1 次针对 1 000 名驾驶人调查中,有 55%的驾驶人承认有过疲劳驾驶经历,更有 23%的驾驶人曾经在行驶过程中睡着^[4]。由于引起驾驶人疲劳的因素常见且众多,因此疲劳驾驶是最为普遍和最危险的驾驶行为之一^[5]。车载疲劳预警设备是防止疲劳驾驶的重要手段,它通过车载传感器采集疲劳特征指标,并在一定条件下

收稿日期:2014-07-01 修回日期:2014-09-03

* 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室开放基金课题(批准号:2013100)资助

▲第一作者(通讯作者)简介:王雪松(1977—),博士,教授。研究方向:交通安全研究、交通统计分析、交通规划、驾驶模拟器的应用。E-mail: wangxs@tongji.edu.cn

触发视觉、声音等形式的疲劳预警信息提示,帮助驾驶人判断是否还能继续驾驶。

眼闭合时间^[6-8]与车辆偏移^[6,9-10](包含越线)是疲劳驾驶的典型特征指标。郑培研究了眼睛及其疲劳机理,讨论了单位时间内眼睛闭合时间所占的百分率(percentage of eye closed, PERCLOS)和其他眼睛活动测量方法的有效性,确认测量机动车驾驶疲劳最好的方法是 PERCLOS^[11]。Takashi 等^[12]在对驾驶人扫视、SEM(slow eye movement)、瞳孔直径、眨眼和 PERCLOS 眼动指标的警觉性对比分析发现,PERCLOS 对驾驶人警觉性的检测能力最强。PERCLOS 检测的可靠性和实时性都较高,但不同驾驶人的 PERCLOS 有很大不同(比如,有些人睡觉时眼睛不闭合),对于它的检测(需要追踪眼球)有一定的不可靠因素,因此,如果只用它来检测疲劳驾驶,仍然存在误判。驾驶人的车道保持能力随疲劳程度的升高而降低是疲劳驾驶的重要特征,因此车道偏移也是疲劳检测的研究热点。美国 Iteris 公司研制的 AutoVue 系统,它通过 1 个朝向道路前方的 CCD 摄像头检测驾驶人的行车轨迹,在驾驶人因疲劳而导致无意识偏离车道时,可及时向驾驶人发出警告^[13];Chang 等^[14]利用机器视觉检测技术对车道标志线进行实时检测,当发现车辆异常偏离中线位置时,系统会发出警报

提醒驾驶人。车道偏离检测其抗干扰性强、可靠性较高,但是灵敏度相对较低。

单一指标检测的缺陷显而易见,因此,本研究结合闭眼时间和越线行为进行疲劳预警,并利用驾驶模拟器实验来检验预警的识别准确性。

1 指标提取

PERCLOS 是指眼睛闭合时间所占的时间比例,其计算方法有 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,其中 P80 与疲劳程度间具有最好的相关性^[15]。闭眼眼睑开度阈值是计算 PERCLOS 的关键指标。P80 方法中取睁眼眼睑开度的 20% 作为闭眼眼睑开度阈值 E_t ,但由于眼动仪存在对眼睑开度的测量存在误差,导致眼完全闭合时的眼睑开度值不为零,因此 E_t 需要重新标定。

本研究中的闭眼阈值标定方法如下:在实验的初期,取一段明显符合眼动周期变化规律(睁眼、闭眼规律)的驾驶人眼睑开度数据,分别计算 E_{open} 的平均值和 E_{closed} 的平均值,如图 1 所示。 E_t 由下公式计算: $E_t = (\bar{E}_{open} - \bar{E}_{closed}) \times 20\%$ 。一定时间内,眼睑开度值小于 E_t 的样本数为 N_c ,总样本点数为 N ,则 PERCLOS 的计算公式为:PERCLOS = N_c/N 。

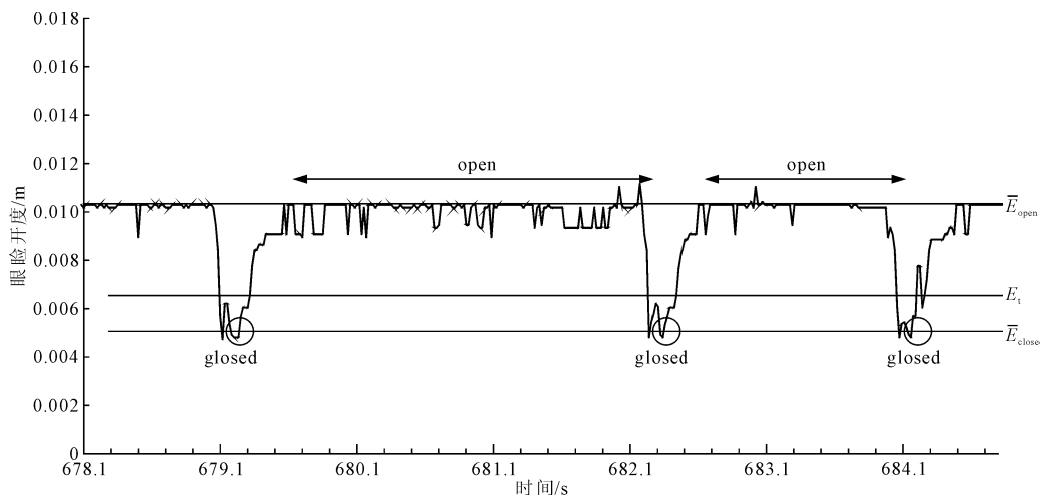


图 1 闭眼阈值计算示意图

Fig. 1 Schematic of eyelid closure threshold calculation

越线是驾驶人的 1 次车边缘驶离车道线(侵占相邻车道或驶离道路)到下 1 次车边缘回到车道内的过程。如图 2 所示,图中的曲线表示车辆重心(center of gravity, COG)的运行轨迹;越线判别线与车道中心线的距离为 1.022 m,即当车

辆中心超越此线时,其车辆边缘即越过车道线。越线时空面积即为越线部分的轨迹与越线判别线之间所围成的面积,如图 2 中的阴影部分面积所示。越线时空面积可以反映一段时间内驾驶人的越线的严重程度。越线时空面积的计算公式为

$$\text{Are_LD} = \sum_{i=1}^n (||LP_i| - 1.022| \times t_i)$$

式中: LP 为车道偏移值, $|LP_i| > 1.022$; t_i 为抽样间隔时间, 本研究中为 0.1 s 。

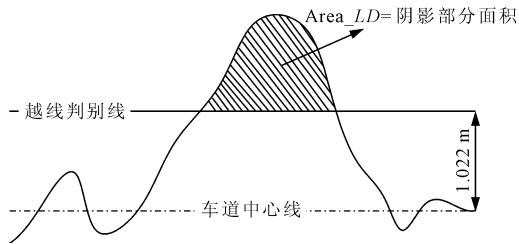


图 2 车道越线指标示意图
Fig. 2 Schematic of lane departure

2 预警逻辑

本研究的预警指标阈值是通过疲劳特征研究的决策树分类确定, 将 $Perclos$ 大于 0.25 , 越线时空面积大于 0 的划分为严重疲劳; 将 $Perclos$ 大于 0.1 , 越线时空面积大于 0 的划分为一般疲劳; 将 $Perclos$ 小于 0.1 且越线时空面积为 0 的划分为不疲劳。整个流程见图 3。

其中, T 值是为了避免驾驶人对频繁提示反感而加入的延缓提示时间(也可以理解为提示后给驾驶人预留的反应窗口时间), 本研究中取 1 min ; 检测窗口 T_w : 取 1 min , 即 $Perclos$ 和越线时空面积都

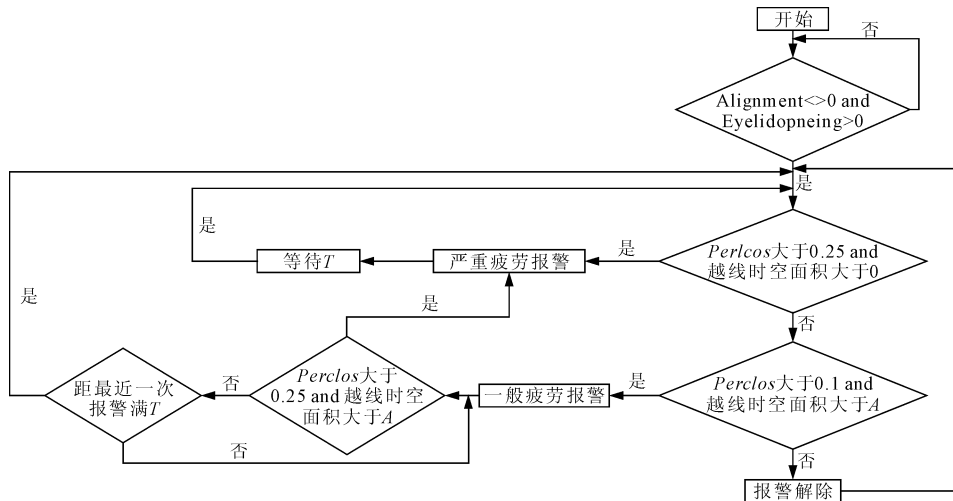


图 3 疲劳预警提示逻辑流程图
Fig. 3 Fatigue warning prompts logic flowchart

计算当前 1 min 的检测步长 T_s : 本研究中取 10 s 。
疲劳预警设备提示图标和实物见图 4。



(c) 疲劳预警设备实物图
图 4 疲劳预警提示设备
Fig. 4 Fatigue warning device

3 实验及数据分析

本研究利用同济大学 8 自由度驾驶模拟器(见图 5)进行仿真实验来检验疲劳预警设备的识别准确性。4 位驾驶人中午用餐后, 在单调的环形高速公路上以 $110 \sim 120 \text{ km/h}$ 的速度行驶 6 圈, 全程约 1 h 。为了让受试人员在有限的实验时间内达到较高的疲劳程度, 每位驾驶人被要求在实验道路上连续驾驶 6 圈(约 1 h), 车速需要保持在 120 km/h 左右; 驾驶期间不需要变换车道; 实验车使用自动挡, 驾驶人无需变换档位; 实验期间不允许驾驶人使用手机、收音机、CD 机等设备; 无环境干扰(例如道路横风); 不需要切换实验车的灯光(白天, 无隧道, 无天气变化); 少量其他交通车辆, 但不阻挡实验车所在车道。在实验过程中, 驾驶模拟器记录下车道偏移值, Smart Eye® 眼动仪记录下驾驶人的眼睑开度, 驾驶人面

部的视频也通过红外摄像头记录。

为了客观的通过外部观测的方式获取驾驶人 KSS 疲劳等级,建立了外部观测的标准。标准的建立主要通过眼睑开度、眨眼速度、眨眼次数、眼球活动、注意力、对外部环境的关注度、反应、抗疲劳动作和精神状态进行判别,该判别相关研究将另行发表。外部观测的疲劳等级与主观疲劳等级进行对比校核发现,外观观测的疲劳等级与主观获取的 KSS 一致率达 86.5%。每分钟 1 次的外部观测获取的驾驶人 KSS 值被作为驾驶人疲劳程度的度量指标。



图5 同济大学 8 自由度驾驶模拟器和 Smart Eye® 眼动仪
Fig. 5 Tongji 8 DOF advanced driving simulator and Smart Eye® eye tracker

为了分析预警的有效性定义了 3 个报警率指标:一般疲劳报警率(WRF)为一般疲劳报警次数与对应 KSS 值总时间(以分钟为单位)的比值;严重疲劳报警率(WRSF)为严重疲劳报警次数与对应 KSS 值总时间(以分钟为单位)的比值;总报警率(TWR)为总报警次数与对于 KSS 值总时间(以分钟为单位)的比值。4 位驾驶人的实验结果分别如下。

驾驶人 1 的 3 圈驾驶中,其外部观测 KSS 值取值为 7,8,9。KSS 为 7 级时,疲劳预警系统无报警;KSS 为 8 时的总报警率为 0.9;KSS 为 9 时的总报警率为 0.89,且驾驶人进入 9 级后,所有报警均为严重疲劳报警。见表 1。

表 1 驾驶人 1 的报警次数与 KSS
Tab. 1 Warning count and KSS of Driver 1

KSS	分钟数	一般疲劳报警次数	严重疲劳报警次数	一般疲劳报警率	严重疲劳报警率	总报警率
7	5	0	0	0	0	0
8	10	3	6	0.3	0.6	0.9
9	18	0	16	0	0.89	0.89

驾驶人 2 的 3 圈驾驶中,其外部观测 KSS 取值为 6,7,8,9。KSS 为 6 时,无报警;KSS 为 7 时,总报警率为 0.25;KSS 为 8 时,总报警率为 1;KSS 为 9 时总报警率为 0.9。见表 2。

驾驶人 3 的 6 圈驾驶中,其外部观测 KSS 值的取值范围为 6,7,8。KSS 为 6 级时,无一般疲

劳报警和严重疲劳报警;KSS 为 7 级时有 1 次一般疲劳报警,总报警率为 0.06;而 KSS 为 8 级时,有 3 次一般疲劳报警和 1 次严重疲劳报警,总报警率为 0.31。见表 3。

表 2 驾驶人 2 的报警次数与 KSS
Tab. 2 Warning count and KSS of Driver 2

KSS	分钟数	一般疲劳报警次数	严重疲劳报警次数	一般疲劳报警率	严重疲劳报警率	总报警率
6	1	0	0	0	0	0
7	8	2	0	0.25	0	0.25
8	7	5	2	0.71	0.29	1
9	11	4	6	0.36	0.54	0.90

表 3 驾驶人 3 的报警次数与 KSS
Tab. 3 Warning count and KSS of Driver 3

KSS	分钟数	一般疲劳报警次数	严重疲劳报警次数	一般疲劳报警率	严重疲劳报警率	总报警率
6	6	0	0	0	0	0
7	18	1	0	0.06	0	0.06
8	13	3	1	0.23	0.08	0.31

驾驶人 4 的 6 圈驾驶中,其外部观测 KSS 值的取值为 8 和 9,对不同 KSS 的报警次数进行统计发现,KSS 为 8 级时,总报警率为 0.41,而当 KSS 为 9 级时,总报警率为 0.86。见表 4。

表 4 驾驶人 4 的报警次数与 KSS
Tab. 4 Warning count and KSS of Driver 4

KSS	分钟数	一般疲劳报警次数	严重疲劳报警次数	一般疲劳报警率	严重疲劳报警率	总报警率
8	17	2	5	0.12	0.29	0.41
9	41	4	31	0.1	0.76	0.86

从 4 位驾驶人的疲劳预警的变化趋势来看严重疲劳报警率、总报警率随 KSS 的升高而升高,一般疲劳报警率在 KSS 小于等于 8 时,随 KSS 的升高而升高,KSS 由 8 变为 9 时,一般疲劳报警率降低。从具体的每个 KSS 等级的报警情况来看,KSS 在 7 级以下的报警率为 0,当 KSS 为 7 级时,存在较低的一般疲劳报警率,但未出现严重疲劳报警;当 KSS 为 8 级时,2 位驾驶人的一般疲劳报警率高于严重疲劳报警率,2 位驾驶人的结果相反;当 KSS 为 9 时,严重疲劳报警率高于一般疲劳报警率,且总报警率在 0.85 以上。

4 结束语

笔者以 PERCLOS 和越线时空面积为疲劳检测依据,开发了疲劳预警设备,并通过 8 自由度驾驶模拟器的实验检验了该设备的疲劳识别准确性。以每分钟 1 次的外部观测的 KSS 值作为驾驶人的疲劳程度,对比分析了不同 KSS 值下疲劳预警设备的提示情况。结果发现:严重疲劳报警

率、总报警率与 KSS 正相关,一般疲劳报警率在 KSS 小于等于 8 时,随 KSS 的升高而升高,KSS 由 8 变为 9 时,一般疲劳报警率降低,严重疲劳报警率大幅升高。KSS 在 7 级以下的报警率为 0,当 KSS 为 7 级时,2 位驾驶出现较低的一般疲劳报警率(分别为 0.09 和 0.25),但未出现严重疲劳报警;当 KSS 为 8 级时,总报警率的平均值为 0.45;当 KSS 为 9 时,严重疲劳报警率高于一般疲劳报警率,且总报警率在 0.85 以上。该报警设备对 KSS 为 9 级的识别准确性较好,而对于 KSS 为 8 级的疲劳识别仍然需要提高才能满足实际检测的需要。

受到时间和实验规模的限制,本研究的样本量较少,因此需要进一步扩大样本进行检验。此外,本研究中的疲劳程度是以视频观测获取,带有主观性,后续研究中需要考虑如何更加客观的获取驾驶人疲劳程度。

参考文献

- [1] 严新平,张 晖,吴超仲,等. 道路交通驾驶行为研究进展及其展望[J]. 交通信息与安全,2013(1):45-51.
Yan Xinping, Zhang Hui, Wu Chaozhong, et al. Research progress and prospect of road traffic driving behavior[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2013(1):45-51. (in Chinese).
- [2] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计资料汇编 2001—2008[Z]. 北京:公安部交通管理局,2009.
The Ministry of Public Security of the People's Republic of China, Road and Transport Authority, Road Traffic Crash Statistics 2001-2008[R]. Beijing: The Ministry of Public Security of the People's Republic of China 2009. (in Chinese).
- [3] US. Department of Transportation. Research and special programs administration. Commercial Transportation Operator Fatigue Management Reference[R]. Washington, DC: US. Department of Transportation, 2003.7
- [4] McCartt A T, Ribner S A, Pack A I, et al. The scope and nature of the drowsy driving problem in New York State[J]. Accident Analysis & Prevention, 1996,28(4):511-517.
- [5] 毛 喆. 机动车疲劳驾驶行为识别方法研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
Mao Zhe. Research on identification of fatigue driving behavior [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese).
- [6] Ingre M, Akerstedt T, Peters B, et al. Subjective sleepiness, simulated driving performance and blink duration: examining individual differences[J]. Journal of Sleep Research, 2006(15):47-53.
- [7] Jo J, Lee S J, Park K R, et al. Detecting driver drowsiness using feature-level fusion and user-specific classification[J]. Expert Systems with Applications, 2014,41(4):1139-1152.
- [8] Hu S, Zheng G. Driver drowsiness detection with eyelid related parameters by support vector machine [J]. Expert Systems with Applications, 2009,36(4):7651-7658.
- [9] Davenne D, Lericollais R, Sagaspe P, et al. Reliability of simulator driving tool for evaluation of sleepiness, fatigue and driving performance[J]. Accident Analysis & Prevention, 2012,45(3):677-682.
- [10] Forsman P M, Vila B J, Short R. A, et al. Efficient driver drowsiness detection at moderate levels of drowsiness[J]. Accident Analysis & Prevention, 2013,50(1):341-350.
- [11] 郑 培. 机动车驾驶员驾驶疲劳测评方法的研究 [D]. 北京:中国农业大学,2002.
Zheng Pei, Study on detecting and evaluating technique of motor driver fatigue[D]. Beijing: China Agriculture University,2002. (in Chinese).
- [12] Takashi Abe, Tomohide Nonomura, Yoko Komada, et al. Detecting deteriorated vigilance using percentage of eyelid closure time during behavioral maintenance of wakefulness tests[J]. International Journal of Psychophysiology, 2011,82(3):269-274.
- [13] Weng M, Chen C, Kao H. Remote surveillance system for driver drowsiness in real-time using low-cost embedded platform[C]// Vehicular Electronics and Safety, 2008. ICVES 2008. IEEE International Conference on. Columbus ohio: IEEE, 2008;288-292.
- [14] Chang T H, Hsu C S, Wang C, et al. Onboard measurement and warning module for irregular vehicle behavior[C]// Hongkong: IEEE Transaction on Intelligence Transportation and System. Hongkong: IEEE 2008;501-513.
- [15] Dinges D F, Grace R. Perclos: A valid psychophysiological measure of alertness as assessed by psychomotor vigilance[R]. Washington, DC: Federal Highway Administration, 1998.