

# 基于驾驶模拟实验的眼部指标与疲劳分级

王雪松, 李飞虎

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 基于同济大学 8 自由度高仿真驾驶模拟器, 利用眼动仪采集了 15 位驾驶员各一小时驾驶过程中眼部指标, 将驾驶员的疲劳状态分为清醒、轻度疲劳、中度疲劳、重度疲劳和极度疲劳 5 个等级, 建立了考虑驾驶员个体差异的分层有序离散选择模型。结果表明: 分层有序离散选择模型能有效地考虑驾驶员的个体差异, 提高了对驾驶员不同疲劳等级的识别准确率。

**关键词:** 驾驶疲劳; 驾驶模拟器; 分层有序离散选择模型; 闭眼百分率(PERCLOS); 瞳孔直径变异系数; 眨眼时间

**中图分类号:** U491

**文献标志码:** A

## Eye Indicators and Drowsy Level Analysis Based on Driving Simulator

WANG Xuesong, LI Feihu

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

**Abstract:** Based on Tongji 8 degrees of freedom driving simulator, 15 samples' eye indicators were collected using the SmartEye. The driver's fatigue was divided into five levels, including awake, mild fatigue, moderate fatigue, severe fatigue and extreme fatigue. Taking into account of the drivers' inter-individual differences, a multilevel ordered logistic model was applied. The results show that the multilevel ordered logistic model can consider the inter-individual differences among drivers effectively and improve the recognition accuracy of drowsy levels.

**Key words:** driver fatigue; driving simulator; multilevel ordered logistic model; percentage of eyelid closure over the pupil over time (PERCLOS); variable coefficient of pupil diameter; blink duration

驾驶员疲劳驾驶时, 其眼部特征主要表现为目光痴呆、注意力下降和抑制自发眨眼等<sup>[1-2]</sup>。与清醒状态相比, 驾驶员疲劳状态下的闭眼百分率(percentage of eyelid closure over the pupil over time, PERCLOS)、瞳孔直径变异系数及眨眼时间等眼部指标均表现出明显的上升趋势, 且不同驾驶员之间具有显著的个体差异<sup>[3-4]</sup>, 因此难以用统一的阈值评价所有驾驶员的疲劳程度<sup>[5]</sup>。

驾驶员疲劳是一个随时间逐渐累积的过程, 不同疲劳状态下的疲劳特征具有不同的变化趋势<sup>[6-7]</sup>。已有大部分研究针对驾驶员清醒状态和疲劳状态特征进行对比分析<sup>[8-9]</sup>, 仅少量研究将驾驶员的疲劳程度分为 3~4 个等级。Ahlstrom 等<sup>[8]</sup>基于卡罗林斯卡嗜睡量(Karolinska sleepiness scale, KSS)表将驾驶员的疲劳状态分为了清醒、疲劳和重度疲劳 3 个等级; Larue 等<sup>[6]</sup>以驾驶前 5 分钟作为参考标准, 利用驾驶员的警觉程度和微睡眠次数作为评判指标将疲劳分成了 4 个等级。驾驶疲劳研究的关键是找到一个能够对驾驶员的疲劳程度进行细分并充分考虑驾驶员个体差异的分析方法。

利用同济大学 8 自由度高仿真驾驶模拟器进行驾驶模拟实验, 通过 SmartEye 眼动仪采集驾驶员驾驶过程中的各项眼部指标, 基于卡罗林斯卡嗜睡量表对驾驶员的疲劳状态进一步细分, 分析驾驶员不同疲劳等级下的眼部疲劳特征, 并对驾驶员的个体差异进行分析, 建立了考虑驾驶员个体差异的分层有序离散选择模型。

## 1 研究综述

闭眼百分率是指眼睛闭合时间在某一特定时间内所占的比例。闭眼百分率有 P70, P80 和 EM 三种

疲劳驾驶是引发交通事故的一个重要原因。驾

收稿日期: 2013-12-04

基金项目: 新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0387); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 王雪松(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为交通安全、交通规划、交通信息化。

E-mail: wangxs@tongji.edu.cn

判定标准,分别表示瞳孔被眼睑纵向遮住 70% 的时间比例、遮住 80% 的时间比例以及眼睑均方闭合率,研究表明 P80 与疲劳程度间具有最好的相关性<sup>[10]</sup>. 与清醒状态时相比,驾驶员疲劳时的闭眼百分率明显上升<sup>[11]</sup>. 嗜睡研究中心(Narcolepsy Research Center)研究发现,驾驶员疲劳时瞳孔会缩小,而清醒时瞳孔直径保持相对稳定<sup>[12]</sup>. 当人体感觉到疲劳时,瞳孔直径会有低频的大幅度波动,并在波动之前,大部分测试者的瞳孔直径迅速减小<sup>[13]</sup>,并且其瞳孔疲劳率(瞳孔直径均值与瞳孔直径标准差的比值)逐渐降低,而驾驶员清醒状态下未表现出这种趋势<sup>[14]</sup>. 眨眼时间是指某一特定时间内驾驶员一次眨眼的平均时间,它也能很好地反映驾驶员的疲劳情况<sup>[15]</sup>. 随着疲劳程度的加深,驾驶员的眨眼时间逐渐增加<sup>[4,16]</sup>,并且事故发生前驾驶员的眨眼时间明显上升<sup>[11]</sup>.

由于生理、精神状态等原因,不同驾驶员之间的疲劳特征存在较大的个体差异. 同一疲劳程度不同驾驶员的疲劳特征值不同,同一疲劳特征不同驾驶员随疲劳程度的变化趋势也不相同<sup>[5]</sup>. Schleicher 等<sup>[1]</sup>在对眨眼频率等疲劳指标与疲劳的研究中发现,有 10%~40% 的驾驶员的部分指标表现出与总体趋势相反的趋势.

已有研究多针对驾驶员清醒和疲劳状态进行对比分析,对驾驶员疲劳程度的进一步细分的研究较少. Caffier 等<sup>[9]</sup>将驾驶员的疲劳程度分为了清醒和疲劳 2 个等级,并运用方差分析法对驾驶员的眨眼时间和眨眼频率进行了检验,差异十分显著. Ahlstrom 等<sup>[8]</sup>基于卡罗林斯卡嗜睡量表将驾驶员的疲劳状态分为了清醒(KSS=1~3)、疲劳(KSS=4~6)和重度疲劳(KSS=7~9)3 个等级,发现驾驶员的瞳孔直径等疲劳特征指标与驾驶员的疲劳状态线性相关,其相关系数达到了 0.73.

国内外研究主要利用人工神经网络和支持向量机模型对驾驶疲劳进行分级<sup>[17-19]</sup>. 人工神经网络最大的优点是训练和自学习功能,但网络结构的选取和网络参数的确定对结果有很大影响,且只能获得局部最优解,对训练数据中的噪声也非常敏感. 支持向量机模型可以避免人工神经网络的网络结构选择、过学习和欠学习以及局部极小等问题,能够利用已知有效算法发现目标函数的全局最小值,但核函数的选择和有关参数的优化较困难,且不能考虑个体之间的差异性. 分层有序离散选择模型是在数据主体具有层级关系的基础上,分析特定条件下特

定微观个体特定行为选择的概率与相关解释变量间的定量关系,它不仅在处理自变量非线性变化和因变量离散的问题上表现出其特有的优势,而且能充分考虑驾驶员的个体差异.

## 2 实验数据采集

### 2.1 实验设备

基于驾驶模拟器进行疲劳研究具有安全性高、再现性好、经济性高等优点. 本实验在同济大学的驾驶模拟器中进行,如图 1 所示. 该驾驶模拟器具有 8 自由度运动系统,驾驶舱为封闭刚性结构,仿真车辆去除了发动机,加载了方向盘、刹车等设备的力反馈系统及数据输入输出设备,投影系统通过五个内置于驾驶舱的投影仪将场景投影到柱形幕上,场景的水平视角为 250°. 模拟平台使用法国 OKTAL 公司开发的 SCANeR™控制软件.

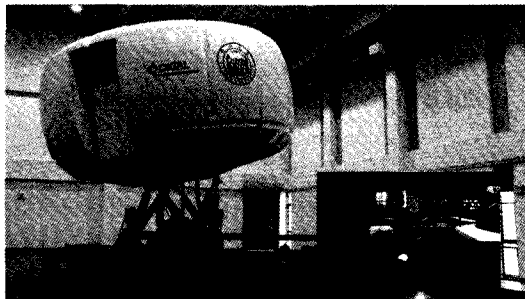


图 1 同济大学驾驶模拟器

Fig.1 Driving simulator of Tongji University

眼动数据通过同济大学四通道 SmartEye 眼动仪进行采集. SmartEye 眼动仪可实现全三维 6 自由度头部跟踪和 2 自由度目光跟踪,采用精密目光凝视模式跟踪眼球运动,数据记录手段可定制. 眼动仪采集的数据包括驾驶员的眼睑开度、瞳孔直径及累计眨眼次数,其中累计眨眼次数通过计数的方式进行累加,非眨眼时段的累计眨眼次数为零值,采集的频率为 60 Hz.

### 2.2 受试驾驶员

实验招募了 15 位受试驾驶员,其中男性驾驶员 13 人,女性驾驶员 2 人,最大年龄 52 岁,最小年龄 22 岁,平均年龄 33.9 岁. 为了获取驾驶员疲劳状态下的眼动数据,受试驾驶员均为实验前一夜未睡眠的值夜班人员. 实验要求驾驶员测试前一星期内未服用任何药物,24 小时内不允许饮酒,12 小时内不允许饮用咖啡、功能性饮料.

### 2.3 实验过程

实验场景道路是一条长为 20 km 的双向 6 车道环形 1 级公路,限速  $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . Thiffault 等<sup>[20]</sup>研究发现不同道路线型对驾驶员的疲劳有不同程度的影响,相对于直线道路,曲线道路能够降低驾驶员的疲劳程度.为了使道路线型更加真实,环形道路由直线路段、大半径曲线路段及缓和曲线路段组成.如图 2 所示,场景中共设置 6 段直线路段,每段直线路段全长 2 000 m,编号为 1,3,5,9,11,13;2 段半径为 700 m、长约 2 000 m 的圆曲线路段,编号为 7,15;直线路段与直线路段之间用大半径 S 形曲线路段连接,编号为 2,4,10,12;直线路段与圆曲线路段间用缓和曲线路段连接,编号为 6,8,14,16.实验道路符合《公路工程技术标准》<sup>[21]</sup>技术规范.

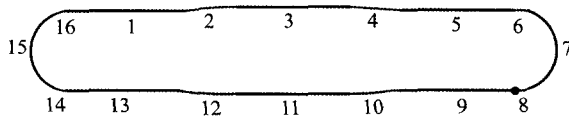


图 2 实验场景道路线形及各路段编号

Fig.2 Road alignments of experimental scene and numbers

实验前每位驾驶员都有 5 分钟时间熟悉驾驶模拟器,实验开始后,驾驶员尽量将车速保持在  $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  左右行驶.实验的起点为路段 1,驾驶员每圈行驶到路段 8 上的圆点时,工作人员询问驾驶员的主观疲劳等级,驾驶员需要根据卡罗林斯卡嗜睡量表对自己的疲劳状态进行评价.卡罗林斯卡嗜睡量表用以下 9 种疲劳程度描述驾驶员的疲劳状态:1-极度清醒;2-非常清醒;3-清醒;4-有些清醒;5-既不清醒也不疲劳;6-开始出现疲劳的征兆;7-疲劳,不用努力来保持清醒;8-疲劳,用一些努力来保持清醒;9-昏昏欲睡,用巨大的努力来保持清醒.实验将驾驶员疲劳状态分为清醒(KSS=1~5)、轻度疲劳(KSS=6)、中度疲劳(KSS=7)、重度疲劳(KSS=8)和极度疲劳(KSS=9)5 个等级.驾驶员需要在环形道路行驶 6 圈,正式实验将持续 60 min 左右.

## 3 数据分析

### 3.1 指标提取

实验道路为由直线路段和曲线路段组成的环形道路,为消除道路线形对驾驶员疲劳程度的影响,仅对驾驶员直线路段的眼动数据进行分析.为避免直

线路段上眼部数据的时间断点,实验以直线路段为分析单元,提取了以下三个眼动指标,具体的计算方法如下:

#### (1) 闭眼百分率

实验采用与疲劳程度相关性最好的 P80 进行计算<sup>[11]</sup>,具体的计算过程如下:取驾驶员清醒状态下前 10 次完整的眨眼周期,分别提取其眼睑开度的最大值  $E_{\max}$  和最小值  $E_{\min}$ ,并计算其眼睑开度的最大值的平均值  $\bar{E}_{\max}$  和最小值的平均值  $\bar{E}_{\min}$ ,则眼睛闭合时眼睑开度的阈值  $E_T = 0.2(\bar{E}_{\max} - \bar{E}_{\min})$ .记驾驶员通过分析单元的时间为  $T$ ,分析单元内眼睑开度小于阈值的时间为  $t$ ,则闭眼百分率  $= \frac{t}{T} \times 100\%$ .

#### (2) 瞳孔直径变异系数

瞳孔直径变异系数为分析单元内的瞳孔直径标准差与瞳孔直径平均值的比值,其计算公式为:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{u}} \quad (1)$$

式中:  $C_v$  为瞳孔直径变异系数,  $\sigma$  为瞳孔直径的标准差,  $\bar{u}$  为瞳孔直径的平均值.

#### (3) 眨眼时间

统计分析单元内累计眨眼次数所有非零值的总个数  $n$ ,由于眼动仪的采样频率为 60 Hz,因此分析单元驾驶员的眨眼总时间  $t_b = n(1/60)$ ,记分析单元内累计眨眼次数的最大值和最小值分别为  $b_{\max}$  和  $b_{\min}$ ,则驾驶员的眨眼时间

$$T_b = t_b / (b_{\max} - b_{\min}) \quad (2)$$

### 3.2 驾驶员个体差异

不同驾驶员之间的个体差异主要表现在以下两个方面:一方面同一疲劳程度不同驾驶员的疲劳特征值不同.以驾驶员重度疲劳状态下的闭眼百分率为例,实验过程中有 8 位驾驶员进入了重度疲劳状态.如图 3 所示,驾驶员的闭眼百分率均值以及波动的幅度差别很大,其中驾驶员 3 的闭眼百分率均值只有 7.2%,而驾驶员 7 的闭眼百分率均值却达到了 29.4%.另一方面同一疲劳特征不同驾驶员随疲劳变化的幅度不同,甚至部分驾驶员表现出与大部分驾驶员相反的变化趋势.以驾驶员 2 和驾驶员 6 为例,如图 4 所示,驾驶员 2 与大部分驾驶员的闭眼百分率变化趋势保持一致,随着疲劳程度的加深而逐渐增加,而驾驶员 6 的闭眼百分率均值变化规律并不明显,并且还出现了递减的现象,另外随疲劳程度的加深驾驶员 6 闭眼百分率变化的幅度也远大于驾驶员 2 闭眼百分率变化的幅度.

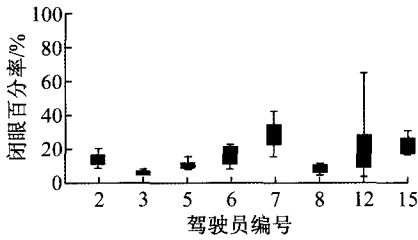


图 3 不同驾驶员重度疲劳时的闭眼百分率

Fig.3 Different driver's PERCLOS under severe fatigue

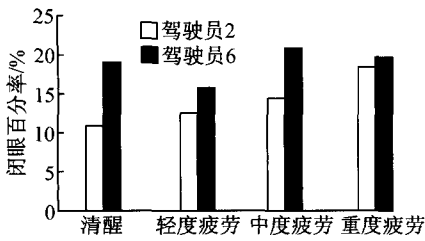


图 4 驾驶员 2 和驾驶员 6 不同疲劳等级下的闭眼百分率均值

Fig.4 Average PERCLOS of driver 2 and driver 6 at different levels of fatigue

### 4 分层有序离散选择模型

为验证分层有序离散选择模型在考虑个体差异上的优越性,建立了未考虑个体差异的有序离散选择模型,并与分层有序离散选择模型进行对比分析. 设  $Y_i$  是第  $i$  个路段上驾驶员的疲劳等级 ( $i=1, 2, 3, \dots, 36$ ). 该方法认为离散变量  $Y_i$  的背后存在一个连续的隐变量  $Y_i^*$ , 而获取离散的  $Y_i$  的过程就是建立一系列阈值, 作为不同  $Y_i$  离散值的区域划分. 本文需要 4 个阈值  $\gamma_k (k=1, 2, 3, 4)$  将驾驶员的疲劳状态分为 5 个等级, 即

$$Y_i = \begin{cases} \text{清醒,} & -\infty < Y_i^* < \gamma_1 \\ \text{轻度疲劳,} & \gamma_1 < Y_i^* < \gamma_2 \\ \text{中度疲劳,} & \gamma_2 < Y_i^* < \gamma_3 \\ \text{重度疲劳,} & \gamma_3 < Y_i^* < \gamma_4 \\ \text{极度疲劳,} & \gamma_4 < Y_i^* < +\infty \end{cases} \quad (3)$$

$$Y_i^* = \theta_i + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$\theta_i = \sum_{p=1}^P \beta_p x_{pi} \quad (5)$$

式中:  $x_{pi}$  是第  $i$  个路段上驾驶员的第  $p$  个协变量,  $\beta_p$  为回归系数;  $\theta_i$  是观测效用项,  $\varepsilon_i$  是误差项, 并假设服从二重指数分布, 其累计分布函数为  $F$ , 则

$$P_{i(k)} = \Pr(Y_i \leq k) = F(\gamma_k - \theta_i) =$$

$$\frac{\exp(\gamma_k - \theta_i)}{1 + \exp(\gamma_k - \theta_i)}, k = 1 \sim 4 \quad (6)$$

对上述累计分布函数进行 Logit 函数变换, 则

$$\begin{aligned} \text{Logit}(P_{i(k)}) &= \log\left(\frac{P_{i(k)}}{1 - P_{i(k)}}\right) = \\ \log\left(\frac{\Pr(Y_i \leq k)}{\Pr(Y_i > k)}\right) &= \gamma_k - \theta_i, k = 1 \sim 4 \quad (7) \end{aligned}$$

分层有序离散选择模型是在有序离散选择模型的基础上, 考虑了不同驾驶员眼动疲劳指标阈值的差异性. 有序离散选择模型的阈值针对的是所有驾驶员的眼动指标, 而分层有序离散选择模型的阈值是基于单个驾驶员的眼动指标进行计算. 设  $Y_{ij}$  为第  $i$  个路段上第  $j$  个驾驶员的疲劳等级 ( $i=1, 2, 3, \dots, 36; j=1, 2, 3, \dots, 15$ ),  $\gamma_{kj} (k=1, 2, 3, 4)$  为将第  $j$  个驾驶员的疲劳程度分为 5 个等级的 4 个阈值, 即

$$Y_{ij} = \begin{cases} \text{清醒,} & -\infty < Y_{kj}^* < \gamma_{1j} \\ \text{轻度疲劳,} & \gamma_{1j} < Y_{kj}^* < \gamma_{2j} \\ \text{中度疲劳,} & \gamma_{2j} < Y_{kj}^* < \gamma_{3j} \\ \text{重度疲劳,} & \gamma_{3j} < Y_{kj}^* < \gamma_{4j} \\ \text{极度疲劳,} & \gamma_{4j} < Y_{kj}^* < +\infty \end{cases} \quad (8)$$

$$Y_{ij} = \theta_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (9)$$

$$\theta_{ij} = \sum_{p=1}^P \beta_{pj} x_{pij} \quad (10)$$

式中:  $x_{pij}$  是第  $i$  个路段上第  $j$  个驾驶员的第  $p$  个协变量,  $\beta_{pj}$  为第  $j$  个驾驶员的回归系数;  $\theta_{ij}$  是观测效用项,  $\varepsilon_{ij}$  是误差项, 并假设服从二重指数分布, 则对于  $Y_{ij}$  的累计分布函数  $F$  有

$$\begin{aligned} P_{ij(k)} &= \Pr(Y_{ij} \leq k) = F(\gamma_{kj} - \theta_{ij}) = \\ &= \frac{\exp(\gamma_{kj} - \theta_{ij})}{1 + \exp(\gamma_{kj} - \theta_{ij})}, k = 1, 2, 3, 4 \quad (11) \end{aligned}$$

对上述累计分布函数进行 Logit 函数变换, 则

$$\begin{aligned} \text{Logit}(P_{ij(k)}) &= \log\left(\frac{P_{ij(k)}}{1 - P_{ij(k)}}\right) = \\ \log\left(\frac{\Pr(Y_{ij} \leq k)}{\Pr(Y_{ij} > k)}\right) &= \gamma_{kj} - \theta_{ij}, k = 1, 2, 3, 4 \quad (12) \end{aligned}$$

对单个驾驶员, 利用  $\gamma_{kj}$  表示驾驶员的不同疲劳阈值, 则

$$\gamma_{kj} = \gamma_k + \sum_{q=1}^Q \alpha_q z_{qj} + B_j, k = 1, 2, 3, 4 \quad (13)$$

式中:  $\gamma_k$  表示所有驾驶员疲劳阈值中的常量;  $z_{qj}$  表示不同驾驶员之间的协变量, 使得不同驾驶员的疲劳阈值有所差异;  $\alpha_q$  表征驾驶员的第  $q$  个指标对疲劳阈值的影响程度;  $B_j$  表示均值为零的随机变量, 且服从  $\tau \sim \text{Gamma}(0.01, 0.01)$  分布.

利用离差信息准则 (deviance information criterion, DIC) 对模型的评价精度进行评价<sup>[22]</sup>, DIC 的计算公式为

$$DIC = D(\bar{\gamma}) + 2p_D = \overline{D(\gamma)} + p_D \quad (14)$$

式中:  $D(\bar{\gamma})$  为评价阈值均值  $\bar{\gamma}$  的偏差;  $p_D$  为衡量模型复杂性的参数, 表示的是模型中有效参数的个数;  $\overline{D(\gamma)}$  为评价阈值偏差的均值, 是模型拟合优度的评价参数. 模型的 DIC 越小, 表示模型的适应性越好.

## 5 疲劳判别模型建立与眼动指标分析

有序离散选择模型和分层有序离散选择模型都

在 Winbugs<sup>®</sup> 的贝叶斯框架下进行, 利用马尔科夫链对模型进行计算, 并将前 5 000 次计算数据作为局部实验数据, 不参与参数估计值的计算, 后 15 000 次计算作为模型参数估计的计算值, 模型的结果如表 1 所示.

通过离散选择模型的 95% 置信区间, 可以分别解释变量的显著性, 若 95% 置信区间未包含零值, 则变量显著. 由以上模型分析结果可知, 驾驶员的闭眼百分率、瞳孔直径变异系数及眨眼时间与疲劳显著相关. 各变量的具体分析如下:

### (1) 闭眼百分率

闭眼百分率主要反映的是驾驶员慢眨眼的频

表 1 有序离散选择和分层有序离散选择模型模拟结果

Tab. 1 Simulation results of ordered logistic and multilevel ordered logistic model

指标	有序离散选择模型		分层有序离散选择模型	
	均值	95% 置信区间	均值	95% 置信区间
$\gamma_1$	-0.482 6	(-1.182 0, 0.095 6)	-2.942 0	(-4.149 0, -2.007 0)
$\gamma_2$	0.806 5	(0.124 2, 1.353 0)	-1.070 0	(-2.257 0, -0.201 0)
$\gamma_3$	2.637	(1.969, 3.153)	1.710	(0.653, 2.472)
$\gamma_4$	4.763	(4.179, 4.993)	4.715	(3.919, 4.993)
闭眼百分率/%	9.785	(7.579, 12.180)	5.540	(2.566, 8.535)
瞳孔直径变异系数	3.739	(1.749, 5.665)	9.503	(5.973, 13.110)
眨眼时间/s	1.798 0	(0.049 8, 3.748 0)	3.785 0	(1.257 0, 6.529 0)
DIC	1 434.19		1 179.46	
准确率/%	42.8		54.7	

率, 模型中的眨眼百分率均值为正, 说明闭眼百分率随着疲劳程度的加深而逐渐增大. Dinges 等<sup>[3]</sup> 在精神警觉任务对疲劳影响的研究中发现, 闭眼百分率是已有眼动指标中最有效的眼动指标, 并且疲劳状态下的闭眼百分率显著高于清醒状态下的闭眼百分率. 图 5 为驾驶员的闭眼百分率在不同疲劳等级下的箱型图, 驾驶员在进入中度疲劳之前, 其闭眼百分率有上升的趋势, 但上升的幅度较小, 而进入重度疲劳之后, 其闭眼百分率的变化幅度较大. 这表明驾驶员在进入中度疲劳之前, 驾驶员的慢眨眼频率较低, 而重度疲劳和极度疲劳时的慢眨眼频率较高.

### (2) 瞳孔直径变异系数

瞳孔直径变异系数反映的驾驶员瞳孔直径的波动情况, 模型中的瞳孔直径变异系数均值为正, 说明瞳孔直径变异系数随着疲劳程度的加深而逐渐增大. Morad 等<sup>[14]</sup> 基于瞳孔直径提取的指标是否与疲劳相关进行了研究, 发现瞳孔疲劳率(瞳孔直径均值与瞳孔直径标准差的比值)随疲劳程度的加深而逐渐降低. 图 6 为驾驶员不同疲劳程度下的瞳孔直径变异系数箱型图, 驾驶员在进入中度疲劳之前, 其瞳孔直径变异系数有上升的趋势, 但上升的幅度较小,

而进入重度疲劳之后, 其瞳孔直径变异系数的变化幅度明显增大, 说明驾驶员在进入中度疲劳之前, 其瞳孔直径相对稳定, 而重度疲劳和极度疲劳时, 其瞳孔直径波动的幅度较大.

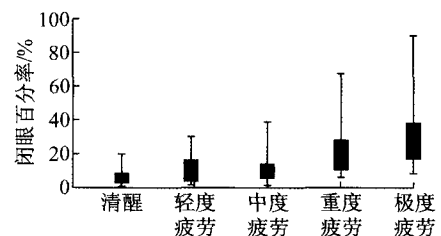


图 5 驾驶员不同疲劳等级下的闭眼百分率

Fig. 5 Driver's PERCLOS at different levels of fatigue

### (3) 眨眼时间

模型中的眨眼时间均值为正, 说明眨眼时间随着疲劳程度的加深而逐渐增大. Ji 等<sup>[4]</sup> 在评估不同眼动指标对疲劳检测有效性的研究中发现, 眨眼时间随疲劳程度的加深而显著增加. 图 7 为驾驶员不同疲劳程度下的眨眼时间箱型图, 驾驶员进入中度疲劳之前, 驾驶员的眨眼时间没有明显的变化趋势,

但进入重度疲劳之后,驾驶员的眨眼时间明显增加,并且出现了长时间闭眼。

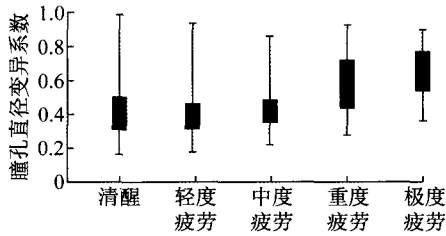


图6 驾驶员不同疲劳等级下的瞳孔直径变异系数

Fig.6 Driver's pupil diameter variation coefficient at different levels of fatigue

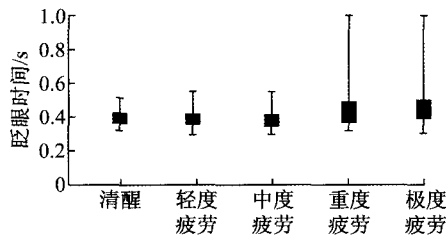


图7 驾驶员不同疲劳等级下的眨眼时间

Fig.7 Driver's blink duration at different levels of fatigue

由以上各指标的箱型图可以看出,不同疲劳程度下的眼动疲劳特征具有不同的变化趋势,不同指标对疲劳的灵敏程度也不相同.闭眼百分率随疲劳程度的加深,具有较明显的变化趋势,而瞳孔直径变异系数和眨眼时间则在进入重度疲劳以后,才具有明显的变化趋势. Larue 等<sup>[6]</sup>和 Ahlstrom 等<sup>[8]</sup>基于卡罗林斯卡嗜睡量表或者微睡眠等评价标准将疲劳分成了3~4个等级,发现眨眼时间等眼动指标随疲劳程度的加深而显著增加,但未对不同疲劳状态下的疲劳特征指标进行对比分析.本研究基于卡罗林斯卡嗜睡量表和眼动指标在不同疲劳状态下的变化特征,将疲劳分成了清醒、轻度疲劳、中度疲劳、重度疲劳和极度疲劳5个等级,并分析了不同疲劳状态下眼动指标的变化特征。

分层有序离散选择模型的DIC值小于有序离散选择模型的DIC值,说明分层有序离散选择模型比有序离散选择模型对驾驶员疲劳状态识别的精度更高.模型的准确率是根据模型对驾驶员疲劳等级的预测结果与驾驶员自我评价疲劳等级是否一致进行评估的,当预测的驾驶员疲劳等级与驾驶员自我评价的疲劳等级一致时,则预测正确,反之,则不正确.模型预测结果表明,分层有序离散选择模型比有序

离散选择模型的准确率更高,分层有序离散选择模型能较好地考虑驾驶员的个体差异性。

## 6 结语

驾驶员在进入中度疲劳之前,闭眼百分率和瞳孔直径变异系数均有增大的趋势,但幅度较小,眨眼时间未发现明显的变化趋势.但驾驶员进入重度疲劳后,闭眼百分率、瞳孔直径变异系数及眨眼时间均大大增加,且驾驶员的闭眼百分率在重度疲劳和极度疲劳下的差异也十分显著.研究结果表明,分层有序离散选择模型比未考虑个体差异的有序离散选择模型准确率更高.但是,分层有序离散选择模型未能反映出不同驾驶员同一疲劳特征变化幅度的差异性,下一步将开展相关的研究工作。

## 参考文献:

- [1] Schleicher R, Galley N, Briest S, *et al.* Blinks and saccades as indicators of fatigue in sleepiness warnings: looking tired? [J]. *Ergonomics*, 2008, 51(7): 982.
- [2] 毛喆,初秀民,严新平,等.汽车驾驶员驾驶疲劳监测技术研究进展[J].*中国安全科学学报*, 2005, 15(3): 108. MAO Zhe, CHU Xiumin, YAN Xiping, *et al.* Advances of fatigue detecting technology for drivers [J]. *China Safety Science Journal*, 2005, 15(3): 108.
- [3] Dinges D F, Mallis M M, Maislin G, *et al.* Evaluation of techniques for ocular measurement as an index of fatigue and the basis for alertness management [R]. Alexandria, VA: National Technical Information Service, 1998.
- [4] Ji Q, Yang X. Real-time eye, gaze, and face pose tracking for monitoring driver vigilance [J]. *Real-Time Imaging*, 2002, 8(5): 357.
- [5] Hagemeyer L, Van Den Hurk P, Nikolaou S, *et al.* Development and application of a universal, multimodal hypovigilance-management-system [R]. Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
- [6] Larue G S, Rakotonirainy A, Pettitt A N. Driving performance impairments due to hypovigilance on monotonous roads [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2011, 43(6): 2037.
- [7] Hargutt V. Das lidschlussverhalten als indikator für aufmerksamkeits-und müdigkeitsprozesse bei arbeitshandlungen [M]. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003.
- [8] Ahlstrom C, Nyström M, Holmqvist K, *et al.* Fit-for-duty test for estimation of drivers' sleepiness level: eye movements improve the sleep/wake predictor [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 26: 20.
- [9] Caffier P P, Erdmann U, Ullsperger P. Experimental evaluation of eye-blink parameters as a drowsiness measure [J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2003, 89(34): 319.

- Committee, 1983: 541-547.
- [6] Khan A S, Liang R Q. Behaviors of three BCC metal over a wide range of strain rates and temperatures experiments and modeling [J]. *International Journal of Plasticity*, 1999, 15(10): 1089.
- [7] Khan A S, Kazmi R, Farrokh B, *et al.* Effect of oxygen content and microstructure on the thermo-mechanical response of three Ti-6Al-4V alloys: experiments and modeling over a wide range of strain-rates and temperatures[J]. *International Journal of Plasticity*, 2007, 23(7): 1105.
- [8] Khan A S, Kazmi R, Farrokh B. Multiaxial and non-proportional loading responses, anisotropy and modeling of Ti-6Al-4V titanium alloy over wide ranges of strain rates and temperatures[J]. *International Journal of Plasticity*, 2007, 23(6): 931.
- [9] Zerilli F J, Armstrong R W. Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 61(5): 1816.
- [10] Zerilli F J, Armstrong R W. Description of tantalum deformation behavior by dislocation mechanics based constitutive relations [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(4): 1580.
- [11] Mecking H, Kocks U F. Kinetics of flow and strain-hardening [J]. *Acta Metallurgica*, 1981, 29(11): 1865.
- [12] Nemat-Nasser S, Guo W, Nesterenko V F, *et al.* Dynamic response of conventional and hot isostatically pressed Ti-6Al-4V alloys: experiments and modeling [J]. *Mechanics of Materials*, 2001, 33(8): 425.
- [13] Nemat-Nasser S, Li Y. Flow stress of F. C. C polycrystals with application to OFHC Cu[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(2): 565.
- [14] Nemat-Nasser S, Okinaka T, Ni L. A physically-based constitutive model for bcc crystals with application to polycrystalline tantalum [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1998, 46(6): 1009.
- [15] Tian R, Li L, De Cooman B C, *et al.* Effect of temperature and strain rate on dynamic properties of low silicon TRIP steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2006, 13(3): 51.
- [16] 范亚夫, 段祝平. Johnson-Cook 材料模型参数的实验测定[J]. *力学与实践*, 2003, 25(5): 40.  
FAN Yafu, DUAN Zhuping. Experimental measurement of Johnson-Cook material model parameters [J]. *Mechanics in Engineering*, 2003, 25(5): 40.

~~~~~

(上接第 231 页)

- [10] Dinges D F, Grace R. PERCLOS: a valid psychophysiological measure of alertness as assessed by psychomotor vigilance [R]. Washington DC, WA: Federal Highway Administration, 1998.
- [11] Papadelis C, Chen Z, Kourtidou-Papadeli C, *et al.* Monitoring sleepiness with on-board electrophysiological recordings for preventing sleep-deprived traffic accidents [J]. *Clinical Neurophysiology*, 2007, 118(9): 1906.
- [12] Krahn L E, Black J L, Silber M H. Narcolepsy: new understanding of irresistible sleep [J]. *Mayo Clinic Proceedings*, 2001, 76(2): 185.
- [13] Nishiyama J, Tanida K, Kusumi M, *et al.* The pupil as a possible premonitor of drowsiness [C]//*Engineering in Medicine and Biology Society*. Lyon: IEEE, 2007: 1586-1589.
- [14] Morad Y, Lemberg H, Yofe N, *et al.* Pupillography as an objective indicator of fatigue [J]. *Current Eye Research*, 2000, 21(1): 535.
- [15] Van Orden K F, Jung T P, Makeig S. Combined eye activity measures accurately estimate changes in sustained visual task performance [J]. *Biological Psychology*, 2000, 52(3): 221.
- [16] 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): 231.  
PAN Xiaodong, LI Junxian. Eye state-based fatigue drive monitoring approach [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2011, 39(2): 231.
- [17] Hu S, Zheng G. Driver drowsiness detection with eyelid related parameters by Support Vector Machine [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(4): 7651.
- [18] 胡淑燕, 郑钢铁. 应用支持向量机的眼睑参数疲劳预测[J]. *北京航空航天大学学报*, 2009, 35(8): 929.  
HU Shuyan, ZHENG Gangtie. Driver fatigue prediction with eyelid related parameters by support vectormachine [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009, 35(8): 929.
- [19] Kurt M B, Sezgin N, Akin M, *et al.* The ANN-based computing of drowsy level [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(2): 2534.
- [20] Thiffault P, Bergeron J. Monotony of road environment and driver fatigue: a simulator study [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2003, 35(3): 381.
- [21] 中华人民共和国交通部. JTG B01—2003 公路工程技术标准[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
Ministry of Communications of the People's Republic of China. JTG B01—2003 Technical standard of highway engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [22] Train K. Discrete choice methods with simulation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.