

# 基于脑电信号的不同年龄段驾驶员疲劳水平评估

凤鹏飞, 薛培友, 卢明宇

(安徽三联学院 交通工程学院, 合肥 230601)

**摘要:**为研究不同年龄段驾驶员的疲劳累积情况,对比其疲劳驾驶的差异性,获取最优驾驶时间,文章通过 eego<sup>TM</sup>mylab 全移动脑电记录分析系统采集脑电数据,结合主观调查法对被试者疲劳状态进行调查。采用 ASA 软件对原始数据进行数据预处理,并通过积分法获得不同时段的  $\alpha$  波、 $\beta$  波、 $\theta$  波的平均功率谱密度,计算出脑电指标  $R_{\alpha/\beta}$ 、 $R_{\theta/\beta}$  及  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$ ,通过 SPSS 对处理后数据进行分析;以  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  作为驾驶疲劳指标,分别求出不同年龄段驾驶员的  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$ ,并将其与驾驶时间进行拟合,分析不同年龄段驾驶员与驾驶疲劳累积速度之间的关系。结果表明:在 2 h 内青年及中年驾驶员疲劳累积速度较慢,老年驾驶员疲劳累积速度较快,青年、中年、老年驾驶员最优驾驶时间分别为 105~120 min, 105~120 min 及 75~90 min。

**关键词:**交通安全;脑电信号;疲劳驾驶;驾驶员年龄

**中图分类号:**TN911.7;U463.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2023)06-0017-05

**DOI:**10.16160/j.cnki.tsxyxb.2023.06.004

## Assessment of Fatigue Level for Drivers of Different Age Groups Based on Electroencephalogram Signals

FENG Peng-fei, XUE Pei-you, LU Ming-yu

(School of Transportation Engineering, Anhui Sanlian University, Hefei 230601, China)

**Abstract:** In order to study the fatigue accumulation for drivers of different age groups, to compare the differences of their fatigue driving, and to obtain the optimal driving time, this paper has collected electroencephalogram data through the eego<sup>TM</sup> mylab full mobile brain-wave recording and analysis system, and combines subjective survey methods to investigate the fatigue state of subjects. The ASA software is used to preprocess the original data, and the integration method is used to obtain the average power spectral density of  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\theta$  waves, and to calculate the brainwave indexes  $R_{\alpha/\beta}$ ,  $R_{\theta/\beta}$  And  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$ . Then the processed data are analyzed through SPSS;  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  is used as an indicator of fatigue driving. The  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  of drivers of different age groups are obtained and they are fitted with driving time to analyze the relationship between drivers of different age groups and the fatigue accumulation rate. The results show that within 2 hours, the fatigue accumulation rate of young and middle-aged drivers is slower, while that of elderly drivers is faster. The optimal driving time for young, middle-aged, and elderly drivers are 105~120 min, 105~120 min, and 75~90 min respectively.

**Key Words:** traffic safety; electroencephalogram signals(EEG); fatigue driving; driver's age

**基金项目:**安徽省高等学校自然科学研究项目(KJ2020A0797);安徽省普通高校交通信息与安全重点实验室项目(JTX202302)

**作者简介:**凤鹏飞(1979—),男,安徽宿州人,教授,硕士,研究方向为交通安全技术应用;

薛培友(1996—),男,安徽宿州人,助教,硕士,研究方向为交通运输规划与管理。

## 0 引言

随着我国经济的发展,机动车保有量和驾驶人数量不断增加。据公安部统计,截至 2023 年 9 月底,我国机动车保有量达到 4.3 亿辆,其中汽车为 3.3 亿辆;机动车驾驶人数量达 5.2 亿人,其中汽车驾驶人数量为 4.8 亿人<sup>[1]</sup>。随着机动车及驾驶员数量的快速增长,交通事故率也逐年递增,相关文献显示,疲劳驾驶是导致交通事故的主要因素之一,20%至 30%的事故与疲劳驾驶有关<sup>[2]</sup>。特别是在高速公路和非城区快速路上,疲劳驾驶引起的事故率超过 30%。令人担忧的是,超过 52%的驾驶员曾有过疲劳驾驶的经历<sup>[3]</sup>。

据相关研究发现,长时间驾驶容易导致驾驶员的生理和心理疲劳,从而降低其反应能力和驾驶技能,形成疲劳驾驶<sup>[4]</sup>。检测驾驶员是否疲劳驾驶,通常采用主观调查和客观生理检测两种方法<sup>[5]</sup>。主观调查一般通过问卷调查或口头询问的方式来确定驾驶员的疲劳状态;客观生理检测则通过监测驾驶员的脑电、心电、眼电等生理指标来分析其与方向盘位置以及行驶路线和速度等驾驶行为之间的关系,进而确定驾驶员的疲劳驾驶状态<sup>[3]</sup>。不同年龄段驾驶员在疲劳驾驶时存在一定差异性,为研究不同年龄段驾驶员的驾驶疲劳累积情况,对比其疲劳驾驶的差异性,获取最优驾驶时间,本文采用生理检测和主观调查相结合的方法,在真实驾驶环境下进行疲劳驾驶检测研究。

## 1 实验设计

### 1.1 实验方案

选用北京现代悦动轿车及模拟驾驶器作为实验车,选取 40 名被试者(男女各 20 人)及 3 名实验助理,由于受外界因素干扰及其他不可控因素影响,最终有效数据为 32 组。本文将被试者按年龄段划分为青年(20~35 岁)男女各 7 人、中年(36~50 岁)男女各 7 人和老年(51~70 岁)男女各 6 人;被试者均考取了 C1 驾照,身体健康,无急性和慢性病史。实验时间段为 9:00~11:00 及 14:00~16:00,主要在交通流

较小的城市道路上进行测试,天气为晴天,实验前要求被试人员 48 h 内禁止饮酒、吃药、化妆。

实验所需数据主要包括:脑电信号、疲劳程度及驾驶时间。本文使用精简的斯坦福嗜睡程度量表(Stanford Sleepiness Scale,简称 SSS)将疲劳驾驶状态分为 4 级,其等级划分见表 1。实验时,被试者佩戴由 ANT Neuro 公司生产的 eego™mylab 全移动脑电记录分析系统电极帽进行实车或模拟驾驶器的操纵,副驾驶 1 号实验助理实时观测道路情况,并观察被试者的驾驶状态;2 号实验助理实时记录被试者 EEG/ERPs 数据变化情况;3 号实验助理每 10 min 对被试者进行疲劳状态询问,并根据其状态对照评分量表确定其得分,分数越高表示其疲劳驾驶程度越大。

表 1 斯坦福嗜睡程度评分量表

| 疲劳等级 | 疲劳程度       | SSS 评分 |
|------|------------|--------|
| 1    | 精力充沛,注意力集中 | ≤2     |
| 2    | 警觉性下降,略有疲劳 | (2,5]  |
| 3    | 反应迟钝,嗜睡感较强 | (5,8]  |
| 4    | 十分疲劳,想睡觉   | >8     |

### 1.2 数据采集及处理

在数据采集前,要求被试者前一天睡眠充足,并安排被试者洗头,禁止使用护发素,确保头皮处于干燥状态。脑电数据采集参数设置为:采样频率 1 000 Hz,高通滤波 0.05 Hz,低通滤波 30 Hz,DC 采集。

在采集实验数据时,步骤主要包括:Options 选项设置、建立放大器模板(硬件层面上定义放大器针脚协议)、建立采集模板(软件层面上与硬件的电极帽针脚名匹配)、设置采集参数、佩戴脑电帽、预览数据和检测电极阻抗、记录数据。原始数据采集状态如图 1 所示。

为减少被试者自身和外部因素对数据的影响,本文通过 ASA 软件对原始数据进行预处理。数据处理步骤主要包括:导入数据、导入电极坐标、导入头模、删除无用通道、插值坏导、转参考、带通滤波 0.5~30 Hz、降采样(减少数据量,提高计算速度)、去除眼电、检测伪迹、分段和归类条件、叠加平均、校正基线、检测峰值、生

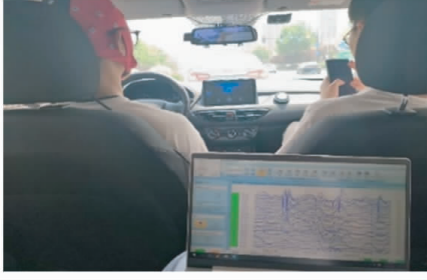


图 1 原始数据采集状态

成 3D 地形图、分析源定位(导入 MRI)等。得到的原始脑电数据及预处理图谱见图 2。

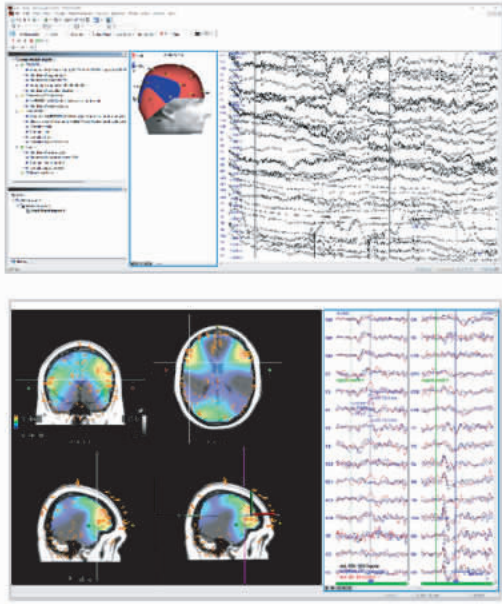


图 2 原始脑电数据及预处理图谱

### 1.3 脑电指标选取

脑电信号能反映大脑组织的电活动和功能状态,常用的频带有  $\alpha$  波(8~13 Hz)、 $\beta$  波(14~30 Hz)、 $\theta$  波(4~7 Hz)及  $\delta$  波(0.5~4 Hz),评估指标通常与这些频带的电压或比值相关。

已有研究表明,当驾驶员出现疲劳时,脑电信号中的特定频带表现出明显的变化。具体而言,疲劳驾驶时,脑电信号中的  $\alpha$  波和  $\beta$  波功率相对减少;同时,脑电信号中的  $P_{\alpha/\beta}$ ,  $P_{\theta/\beta}$  和  $P_{(\alpha+\theta)/\beta}$  三个组合指标呈上升趋势。 $P_{\alpha/\beta}$ ,  $P_{\theta/\beta}$  和  $P_{(\alpha+\theta)/\beta}$  的计算公式如下:

$$\begin{cases} P_{\alpha/\beta} = P_{\alpha}/P_{\beta} \\ P_{\theta/\beta} = P_{\theta}/P_{\beta} \\ P_{(\alpha+\theta)/\beta} = (P_{\alpha} + P_{\theta})/P_{\beta} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $P_{\alpha}$  为  $\alpha$  波的功率,  $P_{\beta}$ ,  $P_{\theta}$ , 同上。

通过对比分析不同频带信号的功率谱与驾驶员疲劳评测结果,发现驾驶员疲劳程度与功率谱的变化存在一定的对应关系。具体而言,  $P_{(\alpha+\theta)/\beta}$  指标越大,驾驶员的疲劳程度越高。

本文基于已有的文献研究,结合实验需求,对预处理后的脑电数据进行功率谱分析。具体而言,就是计算  $\alpha$  波、 $\beta$  波和  $\theta$  波的平均功率谱密度,并通过积分法求得脑电指标  $R$ 。由于  $\delta$  波主要出现在深度瞌睡状态下,不适合用于驾驶行为疲劳检测,因此不对其进行研究。各频带功率谱密度及脑电指标  $R$  计算公式如下:

$$P_{\alpha} = \frac{\int_a^b P(x) dx}{b-a}; \quad (2)$$

$$\begin{cases} R_{\alpha/\beta} = G_{\alpha}/G_{\beta} \\ R_{\theta/\beta} = G_{\theta}/G_{\beta} \\ R_{(\alpha+\theta)/\beta} = (G_{\alpha} + G_{\theta})/G_{\beta} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $G_{\alpha}$  为  $\alpha$  波单频率段的平均功率谱密度,  $G_{\beta}$ ,  $G_{\theta}$  同上;  $P(x)$  为脑电信号的功率谱密度;  $a, b$  分别为  $\alpha$  波频率段的上下限;  $R_{\alpha/\beta}$  为  $\alpha$  波和  $\beta$  波频带间平均功率谱密度的比值,  $R_{\theta/\beta}$ ,  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  同上。

通过积分法得出驾驶员在驾驶过程中的脑电信号平均功率谱密度,其变化趋势见图 3。

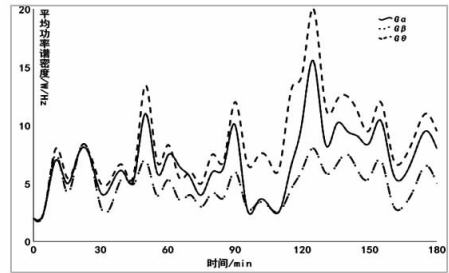


图 3 脑电信号平均功率谱密度

## 2 实验结果分析

### 2.1 脑电信号时间变化规律分析

将处理后的脑电数据每 10 min 截取一次,每组数据可分为 12 个区段,并将 1 s 内的脑电数据进行傅里叶转换(FFT),通过 AR 参数谱估计法得出驾驶员的  $\alpha$  波、 $\beta$  波及  $\theta$  波的平均电压及其组合电压  $U_{\alpha/\beta}$ ,  $U_{\theta/\beta}$  及  $U_{(\alpha+\theta)/\beta}$ , 计算公式

如下:

$$\begin{cases} U_{\alpha/\beta} = U_{\alpha}/U_{\beta} \\ U_{\theta/\beta} = U_{\theta}/U_{\beta} \\ U_{(\alpha+\theta)/\beta} = (U_{\alpha} + U_{\theta})/U_{\beta} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $U_{\alpha}$  为  $\alpha$  波的电压,  $U_{\beta}$ ,  $U_{\theta}$  同上。

通过计算可得出各年龄段驾驶员的脑电变化趋势, 如图 4 及图 5 所示。

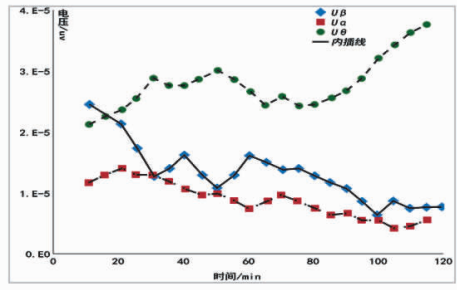


图 4 单一脑电信号指标变化规律

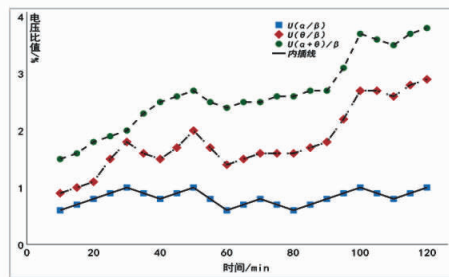


图 5 组合脑电信号指标变化规律

通过数据分析可看出: 在驾驶员连续驾驶过程中, 其  $\alpha$  波的平均电压缓慢下降,  $\beta$  波下降趋势较大,  $U_{\alpha/\beta}$  指标上升趋势较慢, 而  $U_{\theta}$ ,  $U_{\theta/\beta}$  及  $U_{(\alpha+\theta)/\beta}$  呈显著上升趋势。由此可得, 随着驾驶时间的增加, 驾驶员大脑受抑制程度逐渐加深, 驾驶员逐渐进入疲劳驾驶状态。

## 2.2 脑电信号指标合理性分析

利用 SPSS 软件, 通过皮尔逊相关系数 (Pearson Correlation Coefficient) 对脑电指标  $R$  与驾驶时间的相关性进行分析 (数据样本量为 240), 其计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 脑电指标  $R$  与驾驶时间存在显著相关性, 且  $R_{\alpha/\beta}$ ,  $R_{\theta/\beta}$  及  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  与驾驶时间正相关, 这与现有关于疲劳驾驶生理特性的研究结果基本一致, 表明采用脑电指标  $R$  作为疲劳驾驶研究的表征指标是可行的。其中,  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$

与驾驶时间的皮尔逊相关系数最大, 这表明  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  对疲劳驾驶的反应最敏感, 因此本文将  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  作为表征驾驶员疲劳驾驶的脑电指标。

表 2 脑电指标与驾驶时间相关性  
及配对 T 检验

| 脑电指标                        | 皮尔逊相关系数 | 显著水平     |
|-----------------------------|---------|----------|
| $R_{\alpha/\beta}$          | 0.715   | 0.043**  |
| $R_{\theta/\beta}$          | 0.734   | 0.032**  |
| $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$ | 0.906   | 0.005*** |

注: \* 表示在 0.1 水平上显著相关, \*\* 表示在 0.05 水平上显著相关, \*\*\* 表示在 0.01 水平上显著相关

为进一步证实脑电指标选取的有效性, 将得到的  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  指标与不同年龄段驾驶员的主观自评指标 SSS 评分进行相关性分析, 结果见表 3。结果表明:  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  指标与主观自评指标 SSS 评分存在显著相关性。这进一步表明了以  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  作为驾驶员疲劳驾驶测定指标的合理性, 且不同年龄段驾驶员的疲劳驾驶状态存在明显差异。

表 3  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  指标与主观自评 SSS 评分  
相关性分析

| 年龄段 | 指标                          | SSS 评分  |       |       |
|-----|-----------------------------|---------|-------|-------|
|     |                             | $R$     | $R^2$ | $P$   |
| 青年  | $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$ | 0.901** | 0.812 | 0.009 |
| 中年  | $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$ | 0.924** | 0.854 | 0.007 |
| 老年  | $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$ | 0.899** | 0.808 | 0.013 |

注:  $R$  为相关性系数,  $R^2$  为决定系数,  $P$  值为概率

## 2.3 对不同年龄段驾驶员疲劳驾驶影响分析

为进一步研究不同年龄段驾驶员疲劳驾驶的起始时间, 对不同年龄段驾驶员脑电指标  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  的均值进行计算, 其变化规律如图 6 所示。

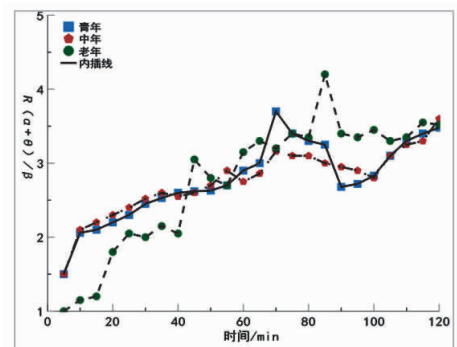


图 6 不同年龄段驾驶员脑电指标变化规律

通过实验结果可知,不同年龄段驾驶员的脑电指标  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  随着驾驶时间的增加呈现出不同的变化趋势。对于青年驾驶员,脑电指标在前 1 h 内呈缓慢上升趋势,70 min 后达到第一个峰值,之后又缓慢下降,90 min 后再次上升。中年驾驶员的脑电指标在前 55 min 内缓慢上升,55 min 时出现第一个峰值,随后波动不定,随着驾驶时间的延长,指标缓慢上升,在 2 h 时产生第二个峰值。老年驾驶员的脑电指标最初上升迅速,但在 25 min 时开始下降,然后又缓慢上升,在连续驾驶 45 min 时达到峰值,之后再次下降,55 min 后继续缓慢上升。

综合分析可得出:随着驾驶时间的增加,不同年龄段驾驶员的疲劳感出现的时间有所不同,但是脑电指标  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  皆呈现出明显的增长趋势。同时主观调查的结果表明,不同年龄段的驾驶员在连续驾驶 60 min 后均出现不同程度的疲劳感。这说明随着驾驶时间的延长,驾驶员的大脑活动呈现出逐渐增强的趋势,驾驶员的疲劳状态在生理上得到了验证。

为深入探究不同年龄段驾驶员脑电指标的变化趋势,本文将  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  均值与驾驶时间进行回归拟合,拟合结果如图 7 所示。

不同年龄段驾驶员脑电指标与驾驶时间的拟合结果显示,青年、中年及老年驾驶员的拟合结果均为三次方程拟合度最高,其  $R^2$  分别为 0.886, 0.915 和 0.930。拟合公式如下:

$$y(\text{青年}) = 1.3732 + 0.0516x - 0.0006x^2 + 2.2107e-006x^3; \quad (5)$$

$$y(\text{中年}) = 1.4203 + 0.0556x - 0.0007x^2 + 3.4238e-006x^3; \quad (6)$$

$$y(\text{老年}) = 0.6524 + 0.0534x + 0.0002x^2 - 6.2765e-007x^3。 \quad (7)$$

#### 2.4 不同年龄段驾驶员的最优驾驶时间

由上述分析结果可知,青年、中年及老年驾驶员的脑电指标分别在 70 min, 55 min 及 45 min 时出现第一个峰值;结合主观调查可知,不同年龄段驾驶员在 60 min 后均出现不同程度的疲劳感。为更好地确定不同年龄段驾驶员的最优驾驶时间,选取驾驶过程 60 ~ 75 min,

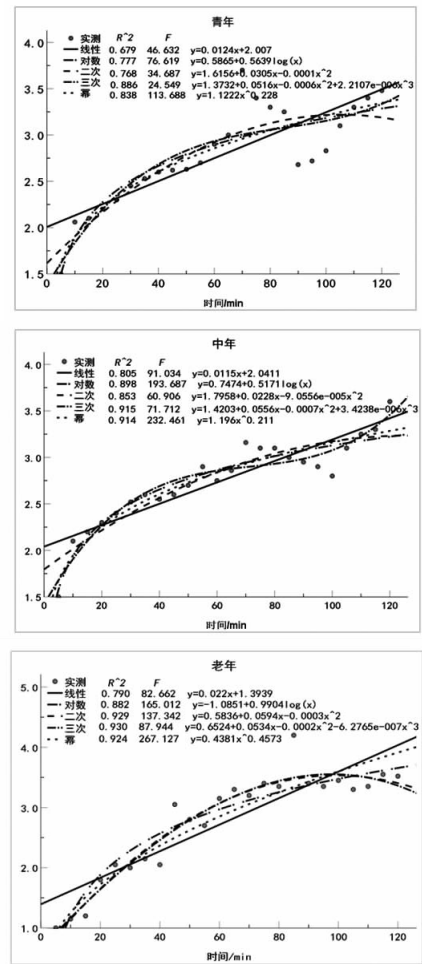


图7 不同年龄段驾驶员脑电指标与驾驶时间拟合结果

75 ~ 90 min, 90 ~ 105 min, 105 ~ 120 min 四个时段的脑电指标  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$ , 将它们与实验未开始时所采集的驾驶员清醒脑电指标  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  进行成对样本 T 检验, T 检验结果如表 4 所示。

由表 4 可知,青年、中年及老年驾驶员的脑电指标  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  分别于 105 ~ 120 min, 105 ~ 120 min, 75 ~ 90 min 时,  $p$  值均低于 0.05, 表明此指标出现显著性变化, 这与疲劳程度主观调查结果接近。由此可知, 青年、中年及老年驾驶员于 105 ~ 120 min, 105 ~ 120 min, 75 ~ 90 min 出现疲劳状态。根据上述拟合公式求得对应的脑电指标  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  分别为 3.06 ~ 3.48, 3.25 ~ 3.78, 2.71 ~ 3.26, 结合表 1 可得出不同年龄段驾驶员最优驾驶状态的脑电指标  $R_{(\alpha+\theta)/\beta}$  阈值, 如表 5 所示。(下转第 37 页)

## 参考文献:

- [1] 赵民,唐雨晴,曹喆,等. 金刚石圆锯片振动噪声实验分析[J]. 石材,2023(7):10-12.
- [2] 吴齐,刘文俊. 高性能 75Cr1 锯片材料热处理及防锈工艺研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2023,45(3):96-100.
- [3] 袁哲,曹瑞元,赵民. 金刚石圆锯片模态分析[J]. 制造业自动化,2013,35(17):147-149.
- [4] 姚涛,段国林,蔡瑾. 圆锯片噪声与振动特性及降噪技术研究综述[J]. 振动与冲击,2008(6):162-166.
- [5] 吴雪松,张健,张秀伟. 金刚石圆锯片应力

计算模型建立及求解[J]. 大连理工大学学报,2001(4):477-480.

- [6] 常涛涛,刘志刚,裴承慧,等. 沙柳平茬圆锯片瞬态响应分析及结构优化[J]. 内蒙古工业大学学报(自然科学版),2023,42(1):38-44.
- [7] 李阳,王砚军,秦可. 基于 ANSYS Workbench 金刚石圆锯片的力学分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2017,37(2):41-45.
- [8] 赵磊,胡欢,孙爽. 基于有限元理论分析掏孔对金刚石圆锯片刚度的影响[J]. 石材,2020(7):22-24.

(责任编辑:白丽娟)

(上接第 21 页)

表 4 成对样本 T 检验结果

| 年龄段 | 不同时段检验结果  |          |           |          |            |          |             |          |
|-----|-----------|----------|-----------|----------|------------|----------|-------------|----------|
|     | 60~75 min |          | 75~90 min |          | 90~105 min |          | 105~120 min |          |
|     | <i>t</i>  | <i>p</i> | <i>t</i>  | <i>p</i> | <i>t</i>   | <i>p</i> | <i>t</i>    | <i>p</i> |
| 青年  | 1.313     | 0.235    | 2.622     | 0.065    | 3.142      | 0.061    | 4.924       | 0.016    |
| 中年  | 1.387     | 0.211    | 1.945     | 0.106    | 2.331      | 0.105    | 3.155       | 0.046    |
| 老年  | 2.675     | 0.103    | 4.081     | 0.033    | 4.306      | 0.012    | 8.867       | 0.001    |

表 5 最优驾驶状态脑电指标  $R_{(a+\theta)/\beta}$  阈值

| 年龄段 | $R_{(a+\theta)/\beta}$ 阈值 |
|-----|---------------------------|
| 青年  | $\leq 3.06$               |
| 中年  | $\leq 3.25$               |
| 老年  | $\leq 2.71$               |

时间:青年驾驶员为 105~120 min,中年驾驶员为 105~120 min,老年驾驶员为 75~90 min.

## 参考文献:

- [1] 公安部交通管理局. 全国机动车达 4.3 亿 辆 驾驶人达 5.2 亿人 新能源汽车保有量达 1821 万辆[EB/OL]. (2023-10-10). <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c9244746/content.html>.
- [2] 张弯. 基于脑电与眼电融合的便携式疲劳驾驶检测方法优化[D]. 西安:西安理工大学,2023.
- [3] 付强. 基于脑电信号的高速公路驾驶疲劳检测研究[J]. 辽宁省交通高等专科学校学报,2016,18(3):15-17.
- [4] 裴玉龙,金英群,陈贺飞. 基于脑电信号分析的不同年龄驾驶人疲劳特性[J]. 中国公路学报,2018,31(4):59-65.
- [5] 徐任倩. 基于脑电信号的驾驶疲劳研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2022.

(责任编辑:冯兆娜)

## 3 结论

根据实车及模拟驾驶城市道路行车过程,分析不同年龄段驾驶员脑电指标与驾驶时间的变化规律,得出以下结论。

(1)通过将驾驶员脑电指标变化规律与主观调查相结合,可以推导出用脑电指标来评判驾驶员的疲劳状态是可行的,其中脑电指标  $R_{(a+\theta)/\beta}$  对驾驶员的疲劳反应最为显著。

(2)在实验中观察到,青年、中年及老年驾驶员的脑电指标分别于 70 min,55 min 及 45 min 时出现第一个峰值。结合主观调查的结果,可以推断驾驶员在城市道路上连续驾驶 60 min 后便会出现不同程度的疲劳状态。

(3)通过对不同年龄段驾驶员脑电指标  $R_{(a+\theta)/\beta}$  与实验未开始时所采集的清醒脑电指标进行成对样本 T 检验,可以得出以下最优驾驶