

草原公路车载个性化防疲劳预警策略

伍毅平¹, 赵子龙¹, 彭志彪², 荣建¹

(1. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124; 2. 北京中交华安科技有限公司, 北京 100088)

摘要: 为制定针对草原公路驾驶疲劳的有效预警策略,以驾驶人在草原公路连续驾驶时的易疲劳点为基础,参照应激反应理论和神经语言程序理论将驾驶人划分为视觉型、听觉型和触觉型3种刺激偏好类型,结合已有典型防疲劳车载设备确定刺激手段和参数,构建了满足驾驶人刺激选择偏好的车载差异化驾驶防疲劳预警策略,并通过对比驾驶模拟实验验证了策略的有效性。研究表明:相比其他刺激模式及空白对照组,给予驾驶人所属类型预警刺激时,其驾驶疲劳状态自评值、速度特征值、加速度特征值、横向偏移特征值和节气门功效特征值在实验前后变化最小;驾驶人对所偏好预警信号刺激的理解度和接受度最高,烦扰度最小;TOPSIS综合评价结果显示,不同刺激模式缓解驾驶疲劳效果不同,随着疲劳程度加深,给予驾驶人所偏好的预警刺激信号可以更加有效地缓解驾驶疲劳。

关键词: 驾驶疲劳; 草原公路; 防疲劳预警; 个性化; 驾驶模拟; TOPSIS 综合评价

中图分类号: U 491

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2023)08-0884-12

doi: 10.11936/bjutxb2022050009

Personalized On-board Warning Strategies for Driving Fatigue on Grassland Highway

WU Yiping¹, ZHAO Zilong¹, PENG Zhibiao², RONG Jian¹

(1. Faculty of Architecture and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Riou Traffic Safety Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: To develop an effective warning strategy for driving fatigue on grassland highway, which is based on the prone points of driver fatigue during driving on grassland highway, drivers were divided into three types of stimulation preference (i. e., visual, auditory, and tactile) according to stress response theory and neuro-linguistic program theory. The existing typical anti-fatigue on-board equipment was referenced to determine the stimulation means and parameters for driving fatigue. A personalized anti-fatigue warning strategy was constructed to satisfy drivers' various preferences for stimulus selection. The effectiveness of this strategy was verified by driving simulator experiments. Results show that compared with other stimulus modes and blank control group, when the type of warning stimulus was preferred by drivers, the self-rating value of driving fatigue state, speed eigenvalue, acceleration eigenvalue, lateral offset eigenvalue and throttle power eigenvalue changed the least before and after the experiment. Drivers have the highest understanding and acceptance as well as the least disturbance of the preferred warning stimulus. The evaluation results by TOPSIS method indicated that different stimulus modes had different effects on alleviating driving fatigue. With the deepening of fatigue degree, drivers' preferred warning

收稿日期: 2022-05-13; 修回日期: 2022-09-09

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1600500)

作者简介: 伍毅平(1990—), 男, 副教授, 主要从事驾驶行为、交通安全、智能交通方面的研究, E-mail: wuyiping@bjut.edu.cn

stimulus would alleviate driving fatigue more effectively.

Key words: driving fatigue; grassland highway; anti-fatigue warning; personalization; driving simulator; TOPSIS comprehensive evaluation

据世界卫生组织报告数据显示,世界上每年约有 125 万人死于道路交通事故^[1],在引发道路交通事故的主要原因中,由于驾驶人操作不当造成的交通事故高达 95% 以上。其中,驾驶疲劳造成的交通事故非常常见,尤其是在特大交通事故中,由于驾驶疲劳引发的事故所占比例远高于其他事故致因^[2]。

驾驶疲劳是指驾驶人在道路上长时间持续驾驶造成心理机能下降,进而影响外在身体特征、面部特征以及驾驶操作能力等的变化,主要表现为驾驶操作失误、驾驶技能下降等^[3]。引起驾驶疲劳的主要原因大致可分为内部因素和外部因素 2 个方面。内部因素主要指驾驶人生理特点(如年龄、性别、驾龄等)和生活特征(如家庭生活、工作情况等)^[4]。外部因素指驾驶人所处外部环境,包括温度、湿度和噪声等车内环境以及路侧景观、路况、道路线形、天气等车外环境^[5]。单调且高重复性的低负荷驾驶环境是引起驾驶疲劳的主要原因之一^[6]。由于草原地区地势平坦,地形和地貌单一,人口密度较低,造成草原公路具有长直线多、纵坡坡度小、圆曲线半径较大、景观单一、植被覆盖率低、沿线附属设施少、车流量较小等特点,属于典型的单调驾驶环境。驾驶人在草原公路行车过程中受到的视觉刺激少,驾驶操作少,精神负荷低,导致驾驶疲劳频发,严重影响行车安全^[7-8]。因此,有必要面向草原公路驾驶疲劳特点,针对性制定驾驶疲劳防控策略,从而降低行车风险。

目前,针对驾驶疲劳防控策略的研究主要围绕道路线形优化、道路环境完善和车端预警设备研发展开。在改变路面和路侧环境方面,Rosey 等^[9]通过驾驶模拟实验验证了在路肩上铺装不同颜色沥青可以有效缓解驾驶疲劳。毛科俊^[10]给出单调环境中缓解驾驶疲劳的景观设计建议为:景观刺激点间隔为 5 min、道路设计速度 60 km/h 时,对应圆曲线半径为 250 m。此外,在道路边缘或中线设置隆声装置也广泛应用于驾驶疲劳干预,以声音和振动提醒司机注意驾驶疲劳^[11]。

在车载驾驶疲劳预警方面,依靠传感器检测驾驶人驾驶疲劳状态,并在疲劳状态达到特定阈值时发出警告信号,主要分为视觉、听觉和触觉信号。汪

鑫勇^[12]基于单片机、嵌入式操作系统和图形文件系统开发了具有驾驶疲劳检测和预警功能的软硬件系统,并以闪烁作为驾驶疲劳预警信号。石磊^[13]基于 Android 系统设计了驾驶疲劳预警系统,通过智能检测车辆方向盘转动情况监测驾驶疲劳状态,利用语音播报对驾驶人发出驾驶疲劳警告。李修权^[14]通过智能手环获取驾驶人心电图(electro cardio gram, ECG)数据,以心率变异性(heart rate variability, HRV)为驾驶疲劳检测指标,通过手环震动的方式提醒驾驶人注意驾驶疲劳。

当前针对防控驾驶疲劳路端设施和车端设备的研究成果较为丰富,对驾驶疲劳预警和防治具有积极效果。但是,已有研究多以单点及单一刺激方式为主,较少考虑不同驾驶疲劳状态和驾驶个体差异化信息需求的影响,其应用效果还有较大提升空间。因此,有必要研究制定既针对草原公路驾驶疲劳特征又满足驾驶人个体需求差异的驾驶疲劳预警策略,以提升驾驶疲劳预警防控效果。

本文采用具有安全风险低、条件可控制、因素可重复的驾驶模拟技术,以团队前期研究获得的草原公路驾驶防疲劳刺激响应特征为基础^[15],依据应激反应理论和神经语言程序理论确定驾驶人分类原则,并基于马斯洛需求层次理论设计驾驶人分类问卷和人群划分方法,进而结合较成熟的车端驾驶疲劳预警设备类型和参数,匹配建立针对驾驶个体需求的车载个性化驾驶疲劳预警策略并测试验证其有效性。研究提出的草原公路车载个性化防疲劳预警策略,有助于提升草原公路驾驶疲劳预警防控效果。

1 驾驶人类型划分

1.1 分类原理

驾驶疲劳预警过程属于一种应激反应。预警信号刺激驾驶人感官器,由神经系统传给大脑加工,经大脑判断后将命令传给手脚效应器官,进行驾驶操作^[16]。根据神经语言程序理论^[17],虽然驾驶人均用视觉、听觉和触觉感知,但受个人习惯和外在因素影响,个体感知类型侧重点不同。驾驶人对自己偏好的信息关注较多,分配注意资源较多。因此,根据个体对感知类型侧重点不同,本文将驾驶人分为视

觉型、听觉型和触觉型3种。其中,视觉型更偏好图像类信息;听觉型更偏好声音类信息;触觉型更偏好与身体有直接接触类的信息。

1.2 划分方法

通过设计并开展驾驶人分类问卷调查,获取驾驶人信息类型偏好,进而划分驾驶人类型。

1.2.1 问卷设计

本次问卷调查借助问卷星制作、发布和回收问卷数据。问卷共分为3个部分:1)参与者筛选条件。一是参与者需持有C1以上驾照,二是参与者实际开车时间要满1a。若其不满足条件之一则问

卷将自动结束。2)参与者信息偏好。基于改进的马斯洛需求层次理论^[18]设计刺激偏好问卷,由低等级到高等级依次为感官体验需求、交互体验需求、情感体验需求、社会体验需求和个性化体验需求,每个层级设计2个问题共同反映该层级需求。该部分包含视觉偏好、听觉偏好和触觉偏好3个子问卷,需参与者全部完成。视觉偏好问卷如表1所示。3)参与者基本属性。包括性别、年龄和驾龄等基础信息,是否有过驾驶疲劳和草原公路驾驶经验,以及对刺激信号类型的总体偏好。

表1 视觉偏好问卷

Table 1 Visual preference questionnaire

参与者视觉偏好问卷	问卷问题	选项
 <p>视觉预警 LED灯闪烁 预警 驾驶疲劳状态指示灯 仪表盘显示 文字预警信息</p>	<p>①我认为在驾驶疲劳状态下视觉预警对缓解疲劳十分有用; ②我认为在驾驶疲劳状态下我可以接受视觉预警的提示; ③我认为在驾驶疲劳状态下视觉预警不会影响我的正常驾驶; ④我认为我对视觉预警是感兴趣的; ⑤我认为在驾驶疲劳状态下视觉预警不会让我产生负面情绪; ⑥我认为我对视觉预警是十分认可的; ⑦我认为在驾驶疲劳状态下我喜欢视觉预警</p>	<p>○完全不同意 ○不同意 ○说不清 ○同意 ○非常同意</p>

1.2.2 调查结果

问卷调查时间为2020年10月4—10日。共回收问卷435份,其中有效问卷389份。分别对视觉偏好、听觉偏好和触觉偏好3个子问卷进行信度和效度检验,其Cronbach α 系数均 ≥ 0.9 ,KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)值均大于0.9,具有较好的信度和效度。

1.2.3 类型划分

根据问卷得分划分参与者类型,划分流程包括确定层级权重、计算加权综合得分和划分参与者类型,如图1所示。

1) 权重确定

利用结构方程确定各层级权重。首先,分别构建视觉问卷、听觉问卷和触觉问卷结构方程。以视觉问卷结构方程模型为例,如图2所示。 l_1 至 l_5 分别代表改进的马斯洛需求层次模型中由低到高的5个层级; N_{li} 代表各层级中具体问题得分; $e_1 \sim e_{14}$ 为误差变量。

其次,对模型适配度进行检验。检验结果显示

拟合优度指标、标准拟合指标和近似误差的平方根等8个评价指标均满足评价标准,3个结构方程均具有较好的模型适配度。再次,通过对3个模型的直接影响结果分析可知,只有在满足低层级的基本需求后,才会考虑高层级需求。最后,根据直接影响中各路径标准荷载计算各层级权重。

$$K_l = \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 k_{m-l} \quad (1)$$

式中: K_l 表示第 l 层级视觉、听觉和触觉3个标准荷载均值; k_{m-l} 表示第 m 个问卷第 l 层的标准荷载。

$$W_l = K_l / \sum_{l=1}^5 K_l \quad (2)$$

式中 W_l 表示第 l 层级权重。

根据式(1)(2)计算得到各层级权重,如表2所示,结果表明层级越低其权重越大,即低层级需求均会对相邻高层级产生显著影响。

2) 参与者类型划分

在得到各层级权重后,先计算每个参与者在每个层级的得分,然后计算其在视觉、听觉和触觉3个

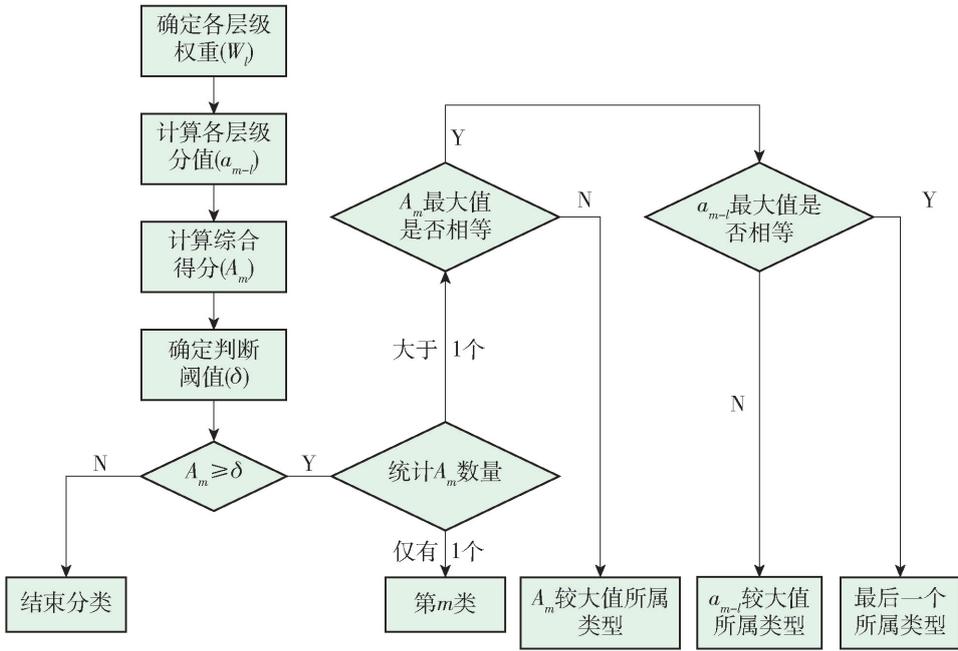


图 1 驾驶人分类流程

Fig. 1 Driver classification process

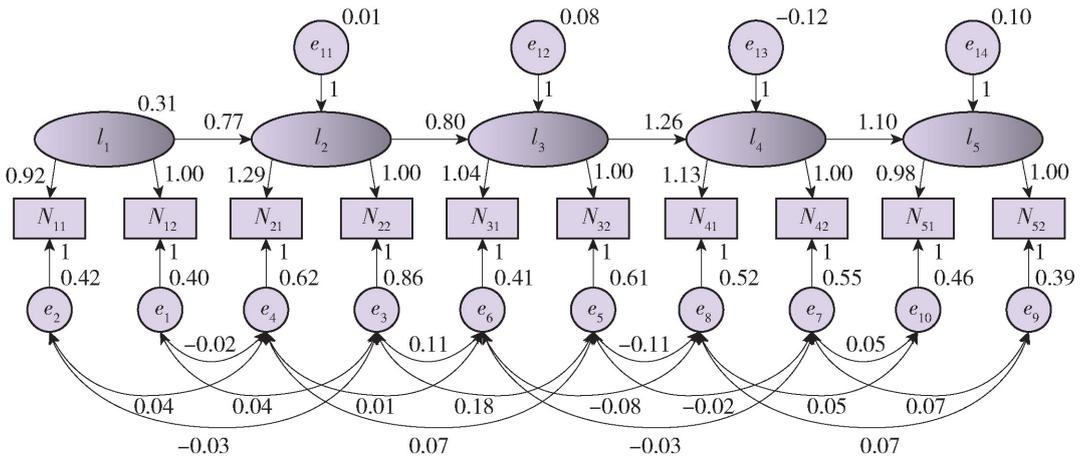


图 2 视觉问卷结构方程模型

Fig. 2 Structural equation model of visual questionnaire

问卷中的综合得分, 计算式为

$$a_{m-l} = \sum_{i=1}^2 N_{m-li} \times W_l \quad (3)$$

$$A_m = \sum_{l=1}^5 a_{m-l} \quad (4)$$

式中: a_{m-l} 表示在第 m 个问卷第 l 层的加权分值; N_{m-li} 表示在第 m 个问卷第 l 层中第 i 个问题的分值。

各问卷加权后总分为 10, 本文定义综合得分判断阈值 $\delta = 7$ 。仅当参与者至少有一个子问卷 $A_m > 7$ 时方可参与类型划分。因此, 若仅有一项 $A_m > 7$, 则被试类型为第 m 类; 若至少有 2 项 $A_m > 7$, 则参与者

类型为 A_m 最大值所对应类型; 若至少有 2 项 $A_m > 7$, 且最大 A_m 值相等, 则为 a_{m-l} 较大值所属类型, 若 a_{m-l} 均相同, 则为最后刺激类型偏好选择的类型。

表 2 各层级权重

Table 2 Weights of each level

层级	感官 体验	交互 体验	情感 体验	社会 体验	个性化 体验
权重	0.286	0.227	0.180	0.167	0.140

3) 参与者划分结果

根据以上分类标准对 389 名有效参与者进行划

分,有55名被试不满足分类需求,问卷有效分类率为85.9%,其中视觉、听觉和触觉3种类型参与者人数分别为94、113、127,分别占有有效分类参与者总人数的28.1%、33.8%和38.1%。

2 驾驶疲劳预警策略设计

驾驶疲劳预警策略主要包括预警时机确定和预警手段选取。根据团队之前研究成果确定预警时机,即草原公路中易疲劳点为连续驾驶时间的第19分和第33分^[15]。预警手段方面,本文结合以往研究并通过对比各类车载预警方式的优缺点,最终确定各类型驾驶人车载驾驶疲劳预警方式和参数。

1) 视觉预警

视觉预警对驾驶人干扰较小,在草原公路中合适的视觉刺激有助于缓解因单调环境所造成的驾驶疲劳。研究证明发光二极管(light emitting diode, LED)对驾驶人注意力所造成的干扰较小,且预警作用生效时间较短^[19]。在驾驶过程中驾驶人对红色视认性最高^[20]。根据李家文^[21]的研究,在轻度疲劳状态下,灯光闪烁频率为1 Hz时其预警效果和可用度最高;随着疲劳程度加深,灯光闪烁频率为2 Hz时其预警效果和可用度最高。因此,选取1、2 Hz分别作为2次易疲劳点的红色LED视觉预警频率,设计红色LED预警时长为9.0 s。

2) 听觉预警

听觉预警更容易引起驾驶人注意,是当前车载预警的主要方式。已有研究表明语音预警在不同疲劳程度下均有较好的预警效果、理解度和接受度^[21]。本文设计语音内容为“您已处于驾驶疲劳高发期,请小心驾驶”,采用男女声交替播报的形式,播报时长9.5 s,女声2次,男生1次,每次2.5 s,间隔1.0 s。声音预警通过放置于车辆音响处的智能蓝牙音箱发出。为了足够引起驾驶人注意,同时不对驾驶人造成干扰,应保证预警声音强度高于环境噪声8~15 dB^[22],因此在本研究中易疲劳点1声音强度设为65 dB,易疲劳点2声音强度设为70 dB。

3) 触觉预警

触觉预警主要是驾驶人通过皮肤感知外部物理压力、痛觉和温度变化以获得预警信息。痛觉会影响驾驶人正常驾驶操作,且驾驶人对较小温度变化的感知不够敏感。李修权^[14]通过智能手环对驾驶人疲劳状态进行检测并利用手环振动进行预警,取得了良好的防疲劳效果。因此,本文选取智能手环振动作为触觉预警方式,佩戴在驾驶人手腕处。在疲劳程度较低时设计手环振动频率为1 Hz,疲劳程度较高时振动频率为2 Hz,振动时长为9.0 s。

综上视觉、听觉和触觉3种刺激方式的设备类型和参数,制定针对不同类型驾驶人个性化车载驾驶疲劳预警策略,如表3所示。

表3 车载驾驶疲劳预警策略

Table 3 On-board driving fatigue warning strategy

驾驶人类型	预警方式	预警位置	预警参数		预警时长/s
			易疲劳点1 (第1次刺激)	易疲劳点2 (第2次刺激)	
视觉型	红色LED	车辆中控台	1 Hz	2 Hz	9.0
视觉型	语音播报	车辆音响	男女声(“您已处于驾驶疲劳高发期,请小心驾驶”)交替3次,每次间隔1 s;声音强度为65 dB	男女声(“您已处于驾驶疲劳高发期,请小心驾驶”)交替3次,每次间隔1 s;声音强度为70 dB	9.5
触觉型	手环振动	驾驶人手腕	1 Hz	2 Hz	9.0

3 实验测试

3.1 被试选取

共招募和测试选取42名有C级驾照的被试。所有被试至少参与过2次驾驶模拟实验,满足模拟驾驶技能要求。通过调查问卷筛选出分类被试共

21名,其中视觉型驾驶人、听觉型驾驶人和触觉型驾驶人各7人,包括14名男性驾驶人和7名女性驾驶人。被试年龄和驾龄范围分别为21~65岁(平均值为37,方差为13)和2~35 a(平均值为13,方差为11)。实验前所有人均没有睡眠障碍,一周内没有服用任何药物,且24 h内无饮酒、喝咖啡或喝茶

等。实验中,分类被试进行2次实验,一次为给予被试所属类型刺激,另一次为给予非被试所属类型刺激,实验顺序随机。其余不分类被试只进行1次实验,在实验中随机给予某种刺激。

3.2 实验设备

利用北京工业大学驾驶模拟器展开,如图3所示。模拟器硬件包括经改造的真实汽车、计算机和视听设备。道路场景被投射到4个大屏幕上,提供了水平方向130°的驾驶视野。有2个侧视镜和1个后视镜用以显示模拟车辆后方道路及交通状况。此外,模拟器还可以模拟和产生视觉、听觉及触觉等感官效应,数据采集频率为1 Hz。



(a) 驾驶模拟器设备



(b) 驾驶操作系统

图3 驾驶模拟器硬件设备和软件系统

Fig.3 Hardware and software system of driving simulator

车载驾驶疲劳预警设备如图4所示。长条形LED可以调节发光颜色和闪烁频率,通过无线控制器控制其开关。驾驶疲劳预警语音导入手机音乐软件并将手机与音响通过蓝牙配对连接后播报,语音播报的开启和声音强度均可以利用手机调节。智能手环自带设置功能,可以设置手环振动强度、频率和时间等参数,还可通过无线控制器控制其振动的开关。

3.3 实验场景

实验基本路段为具有典型草原地区特征的双向四车道一级公路,限速100 km/h。实验道路分为3个部分,路段全长63.8 km。第1部分用于车辆加速到



(a) 长条形LED



(b) 蓝牙音响



(c) 智能手环

图4 车载驾驶疲劳预警设备

Fig.4 On-board driving fatigue warning equipment

期望速度进入实验状态(2.2 km),第2,3部分为正式实验路段(61.6 km)。考虑到道路线形会影响驾驶表现^[23],道路由长直线和大半径反向圆曲线组成, L 为直线长度; R 为圆曲率; L_c 为圆曲线长度,如图5所示。

研究表明,在单调环境下,驾驶疲劳状态出现较快^[24]。按照100 km/h速度计算,被试行驶第1部分道路预计需要1.3 min,行驶第2部分预计需要37.0 min,完成全部场景的驾驶实验时长约为38.3 min。为了营造更加逼真的草原环境,实验道路两侧均为连续的草原场景,并随机添加了山脉、牛羊、蒙古包等具有草原特色的景观。交通流处于自由流状态,5辆车随机分布在实验车辆周围且不造成干扰。

本次实验共有2个场景:第1个场景为单一车端预警,包括听觉、视觉和触觉预警;第2个场景为空白对照组,即没有任何疲劳预警策略。在第1个场景中,预警时刻为正式实验开始后的第19分和第33分。

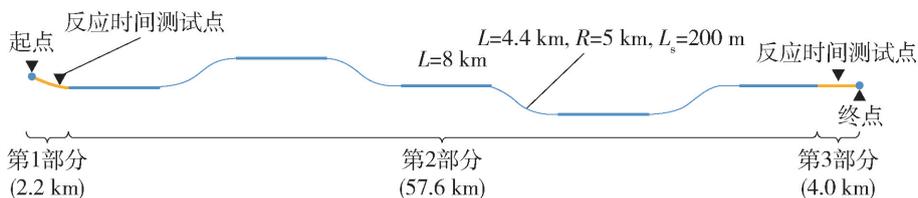


图5 道路线形

Fig. 5 Road alignment

3.4 实验流程

本实验由驾前问卷、预实验、主实验和驾后问卷4个部分组成。

1) 驾前问卷。在进行客观实验前,首先要求被试完成一份主观问卷,除基本信息外,还包括健康状况和目前的心理状态,以及睡眠和醒来时间。

2) 预实验。预实验约5 min,要求被试参与试驾和实验培训,以便熟悉驾驶模拟器操作、实验过程和场景,尽量消除因对模拟驾驶不熟悉而对实验数据造成的影响。

3) 主实验。被试要求只能在右车道行驶,禁止超车和超速行驶。被试按照驾驶习惯在模拟场景中驾驶车辆,直至实验结束。在被试行驶至第19分和第33分时,分别给予对应刺激进行疲劳预警。

4) 驾后问卷。主实验结束后,被试填写驾后问卷,内容包括对车载驾驶疲劳预警的效用评价,并对照KSS量表评估自身当前疲劳状态。

实验中被试驾驶场景顺序随机排列,每完成一个场景后休息10 min,在消除疲劳后再进行下一场景实验。每名被试需前后参加2次实验以完成2个场景,2次实验至少间隔半天时间。驾驶模拟实验安排在早上8点到晚上10点,具体分为3个时间段:早上8点到12点,下午1点到5点,晚上6点到10点。每次驾驶模拟实验前,被试均处于清醒状态。

3.5 实验数据

选用合理的驾驶疲劳特征指标是测试预警策略有效性的关键因素之一。前期研究^[15]基于驾驶模拟实验,收集了23名驾驶人在草原公路驾驶时的驾驶行为、反应时间和心电数据。采用皮尔逊相关系数法和主成分分析法计算了基于驾驶行为数据的驾驶疲劳有效特征指标。最终确定了速度(V)、加速度(A)、横向偏移(L)和节气门功效(P_{AP})4个指标的特征值(E)作为描述驾驶疲劳的特征指标。进而,通过采用均值、标准差和斜率计算驾驶疲劳状态生成过程曲线的特征值并将其归一化(E_{norm}),从而将驾驶疲劳状态分为清醒($E_{norm} = 0$)、轻度疲劳(0

$< E_{norm} \leq 0.25$)、中度疲劳($0.25 < E_{norm} \leq 0.50$)和重度疲劳($0.50 < E_{norm} \leq 1.00$)共4种模式。

在检查数据完整性后,分别提取被试接受第1次刺激和第2次刺激时的 V 、 A 、 L 、 P_{AP} 数据,提取长度为250 m。空白对照组数据截取位置和长度与其相同。为计算驾驶疲劳状态特征值变化值,截取被试在第2部分第1段直线中行驶1 min后的250 m数据作为清醒状态数据。然后分别分析第1次刺激、第2次刺激2种状态下的特征指标特征值与清醒时段相比时的变化值与变异系数,从而表征驾驶人的疲劳状态程度。

本文将驾驶人类型与所接受刺激类型组合分为3种模式 M^- 、 M 、 M^+ 。其中 M^- 表示给予分类被试非所属类型刺激,如给予视觉型驾驶人听觉或触觉刺激; M 表示不对驾驶人分类,随机给予某种刺激; M^+ 为给予分类被试所属类型刺激,如给予视觉型驾驶人视觉刺激。刺激在驾驶人行驶至2个易疲劳点的时刻触发,即预警时刻为正式实验后连续驾驶的第19分和第33分处^[15]。

4 实验结果

4.1 KSS量表分析

通过KSS量表获取被试实验前后驾驶疲劳状态变化值 ΔK 。 ΔK 越小,被试疲劳状态变化越小,说明该预警对疲劳缓解效果越好。在3种模式 M^- 、 M 、 M^+ 下, ΔK 统计结果如图6所示。在3种刺激方式以及整体均值中, M^+ 模式缓解驾驶疲劳的效果更优。通过非参数独立样本K-S检验可知,在3种刺激和整体均值中, M 和 M^+ 具有显著性差异, M^+ 模式缓解驾驶疲劳效果显著。

4.2 主观问卷分析

分析被试对不同刺激方式的信号理解度、烦扰度、预警效果和接受程度评分。评分范围为1~5分(1分为最差,5分为最好),量纲一。

1) 信号理解

被试对不同刺激信号的理解程度如图7所示。

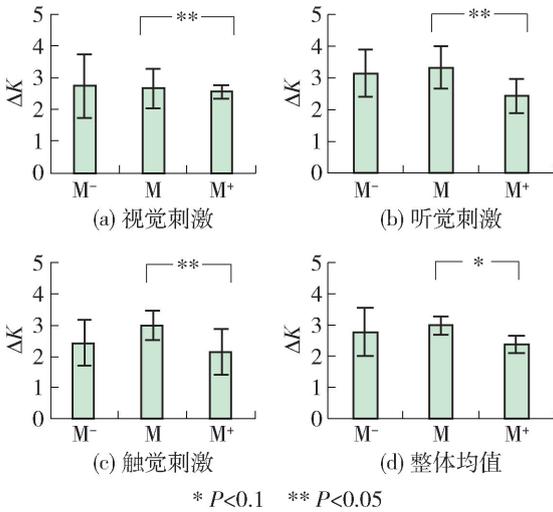


图6 KSS变化值

Fig.6 KSS change value

对应3种刺激, M⁺模式的信号理解评分最高。非参数独立样本 K-S 检验结果表明, 触觉刺激中 M⁻ 和 M⁺ 对信号的理解度评分具有显著性差异。

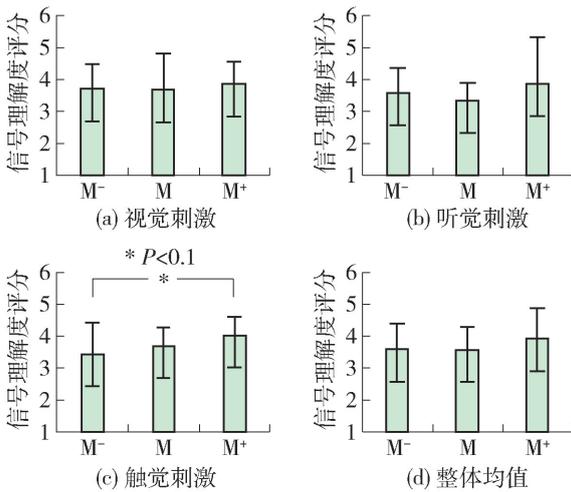


图7 信号理解度评分

Fig.7 Signal understanding score

2) 烦扰度

被试对不同刺激信号的烦扰度评分如图8所示。在3种刺激中, M⁺模式的烦扰度评分均为最低。K-S 检验结果可知, 在视觉、触觉刺激和整体均值中, M⁺模式的烦扰度评分显著低于其他2种。

3) 预警效果

被试对不同刺激信号的预警效果评分如图9所示。在3种刺激中, M⁺模式的预警效果评分均为最高。在视觉、触觉刺激和整体均值中, 被试对 M⁺模式的预警效果评分显著高于 M⁻模式。

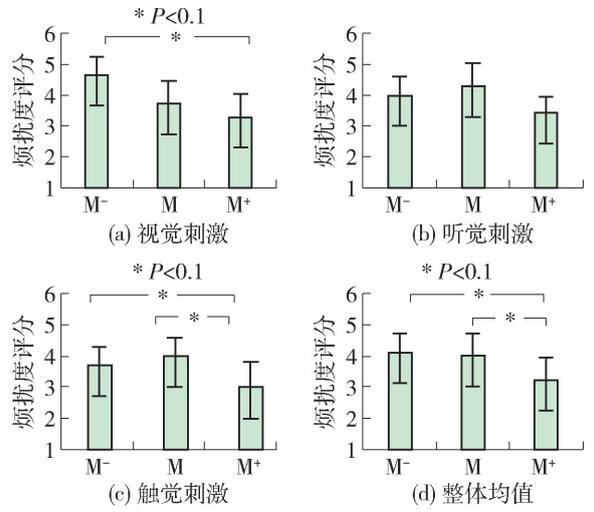


图8 烦扰度评分

Fig.8 Disturbance score

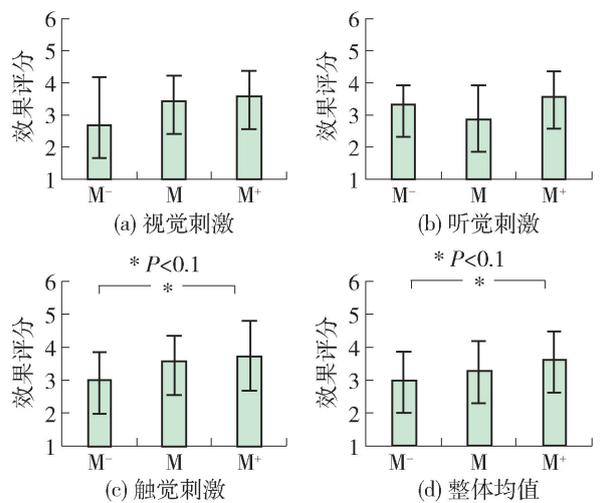


图9 预警效果评分

Fig.9 Early warning effect score

4) 接受程度

被试对不同刺激信号的接受度评分如图10所示。与上述其他主观评价结果类似, M⁺模式对应3种刺激的接受度评分均为最高, 在听觉、触觉刺激和整体均值中, 被试对 M⁺模式的接受度评分显著高于 M 和 M⁻模式。

4.3 行为数据分析

基于前期针对驾驶疲劳特征指标的研究^[15], 分别提取并计算清醒状态标准段、第1次刺激和第2次刺激时的 V、A、L 和 P_{AP} 共4项基础指标, 分析不同状态下的特征指标与清醒时段相比时的变化值与变异系数。

1) 特征指标变化值

特征指标变化值是指驾驶人接受预警时的与清

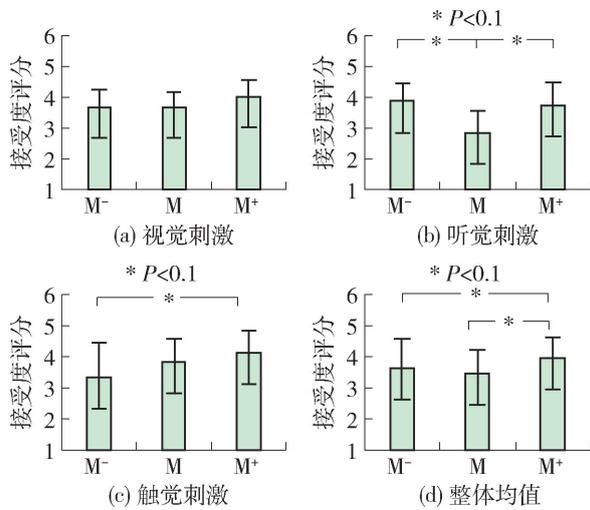


图 10 接受度评分

Fig. 10 Acceptance score

醒时的特征值之差。若刺激具有缓解疲劳的效果,那么刺激模式和清醒状态下的特征值应该相差不大;反之,刺激模式和清醒状态下的特征值差别相对较大。2次刺激的4项特征指标变化值计算结果如表4所示。 M^+ 、 M^- 和M模式的特征指标变化值均小于空白组,说明3种模式的刺激方式均能在一定程度上缓解驾驶疲劳。其中 M^+ 模式中特征指标变化值最小,说明其缓解驾驶疲劳效果最优。

通过K-S检验对同一指标下不同刺激模式间特征指标值的差异性进行显著性分析,结果如表5所示。在第1次刺激的A指标中,空白组与3种模式 M^+ 、M和 M^- 间均具有显著性差异。在第2次刺激的 P_{AP} 指标中,2种模式 M^+ 与 M^- 间具有显著性差异。其余指标下,各刺激模式与空白组之间均不具有显著性差异。

表 4 特征指标变化值

Table 4 Change value of characteristic index

刺激顺序	特征指标	M^-		M		M^+		空白组	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
第1次刺激	ΔV	0.451	2.070	0.404	3.175	0.335	2.905	0.554	1.596
	ΔA	0.246	1.560	0.231	0.875	0.204	1.081	0.442	0.427
	ΔL	1.375	3.071	1.349	3.136	1.137	2.767	1.693	3.123
	ΔP_{AP}	0.053	0.788	0.079	0.214	0.094	0.620	0.139	0.583
第2次刺激	ΔV	1.272	2.681	1.256	1.048	1.106	3.353	1.663	2.514
	ΔA	0.246	0.886	0.200	1.161	0.179	1.639	0.314	0.943
	ΔL	1.867	3.760	2.241	3.055	1.793	2.349	2.569	2.452
	ΔP_{AP}	0.076	0.231	0.061	0.765	0.050	0.627	0.097	0.439

表 5 显著性分析结果

Table 5 Results of explicitness analysis

刺激顺序	刺激模式	显著性				
		V	A	L	P_{AP}	
第1次刺激	M	M^-	$P = 0.871$	$P = 0.103$	$P = 0.701$	$P = 0.274$
		M^+	$P = 0.794$	$P = 0.532$	$P = 0.928$	$P = 0.772$
		空白组	$P = 0.883$	$P = 0.082^*$	$P = 0.172$	$P = 0.819$
	M	M^-	$P = 0.871$	$P = 0.103$	$P = 0.701$	$P = 0.274$
		M^+	$P = 0.486$	$P = 0.549$	$P = 0.859$	$P = 0.486$
		空白组	$P = 0.908$	$P = 0.048^{**}$	$P = 0.608$	$P = 0.433$
	M^+	M^-	$P = 0.794$	$P = 0.532$	$P = 0.928$	$P = 0.772$
		M	$P = 0.486$	$P = 0.549$	$P = 0.859$	$P = 0.486$
		空白组	$P = 0.747$	$P = 0.020^{**}$	$P = 0.415$	$P = 0.928$
空白组	M^-	$P = 0.883$	$P = 0.082^*$	$P = 0.172$	$P = 0.819$	
	M	$P = 0.908$	$P = 0.048^{**}$	$P = 0.608$	$P = 0.433$	
	M^+	$P = 0.747$	$P = 0.020^{**}$	$P = 0.415$	$P = 0.928$	

续表 5

刺激顺序	刺激模式	显著性				
		V	A	L	P _{AP}	
第 2 次刺激	M ⁻	M	P = 0.945	P = 0.472	P = 0.162	P = 0.152
		M ⁺	P = 0.519	P = 0.615	P = 0.684	P = 0.046**
		空白组	P = 0.819	P = 0.561	P = 0.172	P = 0.172
	M	M ⁻	P = 0.945	P = 0.472	P = 0.162	P = 0.512
		M ⁺	P = 0.683	P = 0.166	P = 0.486	P = 0.426
		空白组	P = 0.769	P = 0.206	P = 0.632	P = 0.172
	M ⁺	M ⁻	P = 0.519	P = 0.615	P = 0.172	P = 0.046**
		M	P = 0.683	P = 0.166	P = 0.632	P = 0.426
		空白组	P = 0.924	P = 0.387	P = 0.527	P = 0.862
空白组	M ⁻	P = 0.819	P = 0.561	P = 0.172	P = 0.172	
	M	P = 0.769	P = 0.206	P = 0.632	P = 0.665	
	M ⁺	P = 0.924	P = 0.373	P = 0.527	P = 0.862	

注: 当 $P < 0.1$ 时, 用 * 表示; 当 $P < 0.05$ 时, 用 ** 表示。

2) 特征指标变异系数

为进一步对比不同预警策略缓解驾驶疲劳的效果, 提出变异系数以量化和更加直观刻画不同刺激模式对各特征指标变化的影响, 变异系数为特征指标变化值的差值与特征指标变化值的标准差之比, 其值越小表明预警策略效果越好。

计算 2 次刺激中各指标变异值, 如图 11、12 所示, 3 种模式的指标变异系数整体呈下降趋势。计算不同模式下各指标变异系数均值, 如图 13 所示, 在 2 次刺激中相比于 M 和 M⁻ 模式, M⁺ 模式对疲劳预警和缓解的效果和效果稳定性最好。此外, 第 2 次刺激的变异系数均小于第 1 次刺激, 说明当疲劳程度更高时, 各预警模式的效用更显著。

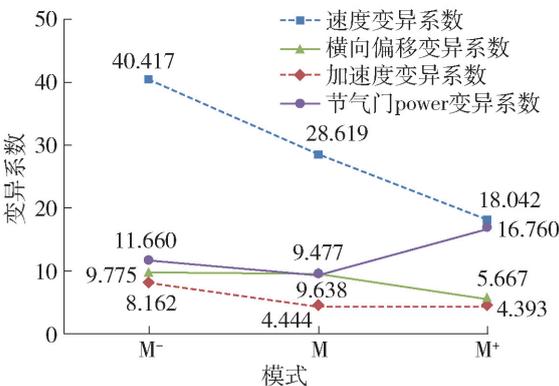


Fig. 11 Coefficient of variation of the first stimulus

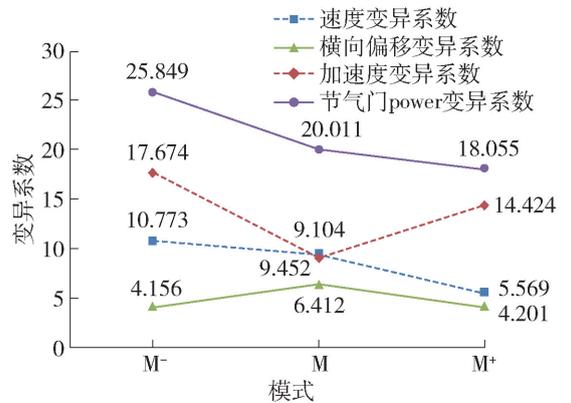


图 12 第 2 次刺激变异系数
Fig. 12 Coefficient of variation of the second stimulus

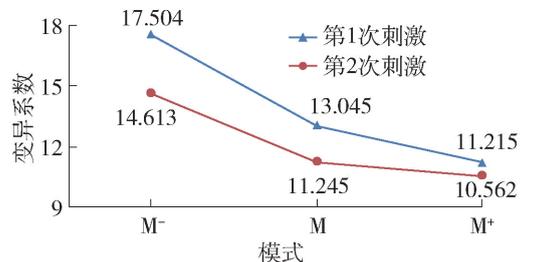


图 13 变异系数均值
Fig. 13 Mean of coefficient of variation

3) TOPSIS 综合评价

TOPSIS 是多目标决策分析中一种常用的有效方法, 它根据有限个评价对象与理想化目标的接近

程度进行排序, 在现有的对象中进行相对优劣的评价。TOPSIS 算法能充分利用原始数据, 从而减少信息损失^[25]。为进一步量化不同预警策略的综合效用, 除单独分析不同预警策略对各单向项指标的影响外, 本研究基于驾驶疲劳特征指标变化值, 通过基于熵权的 TOPSIS 方法对 3 种模式进行综合评价。

计算得到在2次刺激下,4项指标 ΔV 、 ΔA 、 ΔL 、 ΔP_{AP} 的权重分别为0.208,0.372,0.206,0.214;0.246,0.255,0.281,0.219。最终基于TOPSIS的综合评价结果如图14所示。

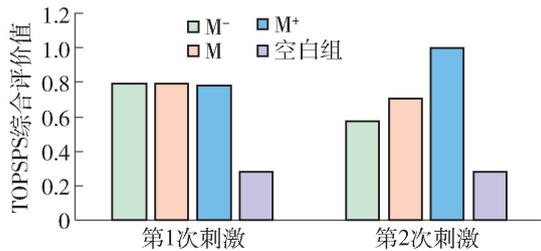


图14 TOPSIS综合评价值

Fig. 14 Comprehensive evaluation value of TOPSIS

在第1次刺激中,3种刺激模式的TOPSIS综合评价价值高于空白组,说明3种刺激模式均有缓解驾驶疲劳的效果,但是在第1次刺激时被试疲劳程度较低,3种刺激模式间的差异表现不明显。在第2次刺激时,3种刺激模式的TOPSIS综合评价价值也均高于空白组。同时由于疲劳程度的增加,3种刺激模式之间的效果差异被体现出来。M⁺模式的综合评价价值最高,说明对疲劳缓解效果最好;M⁻模式的综合评价价值最低,说明对疲劳缓解效果最差。M模式中被试接受的刺激有可能是其所偏好的,也有可能不是其所偏好的,所以整体效果介于另外2种模式之间。总之,对于分类被试,在疲劳状态时给予其所偏好的刺激信号,可以有效缓解驾驶人的驾驶疲劳,即个性化车载驾驶疲劳预警策略更加有效。

5 结论

1) 以驾驶人在草原公路连续驾驶时的易疲劳点研究为基础,参照应激反应理论和神经语言程序理论将驾驶人划分为视觉型、听觉型和触觉型3种刺激偏好类型,结合已有典型防疲劳车载设备确定刺激手段和参数,构建了满足驾驶人刺激选择偏好的车载差异化驾驶疲劳预警策略。

2) 驾驶人对其所偏好的预警刺激信号理解和接受度最高,烦扰度最小,所体现出来的防疲劳效果最优。

3) 相比其他刺激模式及空白对照组,给予驾驶人所属类型预警刺激时,其驾驶疲劳状态自评值、速度特征值、加速度特征值、横向偏移特征值和节气门功率特征值在实验前后变化最小。

4) 不同刺激模式缓解驾驶疲劳效果不同,随着疲劳程度加深,给予驾驶人所偏好的预警刺激信号

可以更加有效地缓解驾驶疲劳。

参考文献:

- [1] New WHO report highlights insufficient progress to tackle lack of safety on the world's roads [EB/OL]. (2018-12-07)[2019-01-03]. <https://www.who.int/news-room/detail/07-12-2018-new-who-report-highlights-insufficient-progress-to-tackle-lack-of-safety-on-the-world's-roads>.
- [2] 马新运. 不同类型音乐对草原公路驾驶员脑疲劳恢复的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021. MA X Y. Effects of different types of music on recovery of brain fatigue in prairie highway drivers [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [3] 马艳丽. 驾驶员驾驶特性与道路交通安全对策研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007. MA Y L. Study on driver characteristics and road traffic safety [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [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. PEI Y L, JIN Y Q, CHEN H F. Fatigue characteristics of drivers of different ages based on EEG signal analysis [J]. China Journal of Highways, 2018, 31(4): 59-65. (in Chinese)
- [5] 王琳虹, 李世武, 周茹波, 等. 高速公路路侧景观色彩对驾驶员心率指标的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(1): 74-80. WANG L H, LI S W, ZHOU R B, et al. Influence of roadside landscape color on driver's heart rate [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(1): 74-80. (in Chinese)
- [6] 阎莹, 袁华智, 杨秀丽, 等. 基于多源数据的单调道路环境与驾驶疲劳关系模型[J]. 中国公路学报, 2021, 34(5): 156-167. YAN Y, YUAN H Z, YANG X L, et al. A relationship model between monotonous road environment and driving fatigue based on multi-source data [J]. China Journal of Highways, 2021, 34(5): 156-167. (in Chinese)
- [7] FARAHMAND B, BOROUJERDIAN A M. Effect of road geometry on driver fatigue in monotonous environments: a simulator study [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology & Behaviour, 2018, 58: 640-651.
- [8] 徐冬青. 草原公路环境下连续驾驶时间对疲劳的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011: 11-12. XU D Q. Effect of continuous driving time on fatigue in grassland highway environment [D]. Hohhot: Inner

- Mongolia Agricultural University, 2011: 11-12. (in Chinese)
- [9] ROSEY F, AUBERLET J M, BERTRAND J, et al. Impact of perceptual treatments on lateral control during driving on crest vertical curves: a driving simulator study [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2008, 40: 1513-1523.
- [10] 毛科俊. 道路环境单调性对驾驶疲劳的影响机理及对策研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011: 97-102.
MAO K J. The influence mechanism and countermeasures of road environment monotonicity on driving fatigue [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011: 97-102. (in Chinese)
- [11] ANUND A, KECKLUND G, VADEBY A, et al. The alerting effect of hitting a rumble strip—a simulator study with sleepy drivers [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2008, 40: 1970-1976.
- [12] 汪鑫勇. 汽车驾驶员嵌入式疲劳预警系统设计[D]. 天津: 天津职业技术师范大学, 2015: 24-43.
WANG X Y. Design of embedded fatigue warning system for automobile drivers [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic Normal University, 2015: 24-43. (in Chinese)
- [13] 石磊. 基于 Android 智能移动终端的汽车疲劳驾驶预警系统的研究与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013: 24-49.
SHI L. Research and implementation of vehicle fatigue driving warning system based on android smart mobile terminal [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013: 24-49. (in Chinese)
- [14] 李修权. 卡车司机疲劳驾驶预警机制及设备设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014: 21-29.
LI X Q. Research on fatigue driving warning mechanism and equipment design for truck drivers [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014: 21-29. (in Chinese)
- [15] PENG Z, RONG J, WU Y, et al. Exploring the different patterns for generation process of driving fatigue based on individual driving behavior parameters [J]. *Transportation Research Record*, 2021, 2675(8): 408-421.
- [16] 黎景壮. 驾驶人在不同预警方式下的应激反应研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 5-7.
LI J Z. Study on stress response of drivers under different warning modes [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 5-7. (in Chinese)
- [17] 闫春梅, 李文慧. 神经语言程序沟通模式介绍[J]. *护理学杂志*, 2004, 19(16): 77-79.
YAN C M, LI W H. Introduction to communication patterns of neurolinguistic programs [J]. *Journal of Nursing*, 2004, 19(16): 77-79. (in Chinese)
- [18] 李科勇. 考虑驾驶风格的驾驶人疲劳驾驶辨识方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017: 38-45.
LI K Y. Study on driver fatigue identification method considering driving style [D]. Changchun: Jilin University, 2017: 38-45. (in Chinese)
- [19] CHEN C, WU C Y, CHEN Y M, et al. Sequential color LED backlight driving system for LCD panels [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(3): 919-925. (in Chinese)
- [20] CARTER R C. Visual search with color [J]. *Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performance*, 1982, 8(1): 127-136.
- [21] 李家文. 驾驶人疲劳状态及交通环境自适应式预警方法的研究[D]. 北京: 清华大学, 2011: 74-105.
LI J W. Study on adaptive warning method of driver fatigue state and traffic environment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011: 74-105. (in Chinese)
- [22] GREEN P, WILLIAMS M. Perspective in orientation/navigation displays: a human factors test [C]//The Third International Conference on Vehicle Navigation and Information Systems. Piscataway: IEEE, 1992: 221-226.
- [23] 张晖, 查尔斯·阿托姆博, 张琦, 等. 考虑道路平曲线设计的驾驶疲劳对车道保持能力影响研究[J]. *交通信息与安全*, 2017, 35(2): 9-15.
ZHANG H, ATOMBO C, ZHANG Q, et al. Research on the influence of driving fatigue on lane keeping ability considering road horizontal curve design [J]. *Traffic Information and Safety*, 2017, 35(2): 9-15. (in Chinese)
- [24] 谢晓莉. 驾驶疲劳生成机理研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2010: 23-36.
XIE X L. Study on formation mechanism of driving fatigue [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010: 23-36. (in Chinese)
- [25] ZHENG H R, NEGENBORN R N, GABRIEL L. Trajectory tracking of autonomous vessels using model predictive control [J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, 47(3): 8812-8818.