

DOI:10.11918/202206028

基于个体信息需求的草原公路防疲劳预警策略

陈家源^{1,2}, 伍毅平^{1,2}, 彭志彪³, 荣建^{1,2}, 周晨静⁴, 陈开群⁵

(1. 北京市交通工程重点实验室(北京工业大学), 北京 100124; 2. 北京工业大学 城市建设学部, 北京 100124;
3. 北京中交华安科技有限公司, 北京 100088; 4. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 102616;
5. 广西新发展交通集团有限公司, 南宁 530029)

摘要:为缓解驾驶人在草原公路行驶产生的驾驶疲劳,设计一种基于个体信息需求的防疲劳预警策略,采用问卷调查将驾驶人划分为视觉型、听觉型和触觉型3类,综合考虑不同类型驾驶人的个性化信息需求,设计路端预警、车端预警和车端路端协同预警3种草原公路驾驶疲劳预警策略,选取21名驾驶人开展驾驶模拟实验,采集驾驶人KSS量表数据、对预警策略的主观评价数据和驾驶行为数据,利用描述性分析、统计分析和基于熵权的TOPSIS综合分析等方法,进行3种驾驶疲劳预警策略的效果测试。结果表明:驾驶人对3种预警策略的接受程度均较高;3种驾驶疲劳预警策略均可以不同程度地缓解驾驶疲劳状态,协同预警策略优于其他两种策略,且疲劳程度越深,缓解效果越显著。基于驾驶人差异化信息需求的车端路端协同防疲劳预警策略有助于提升草原公路驾驶疲劳预防效果。

关键词: 交通工程; 防疲劳策略; 协同预警; 草原公路; 驾驶模拟

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)07-0063-11

Anti-fatigue warning strategy for grassland highway based on information demand of individual drivers

CHEN Jiayuan^{1,2}, WU Yiping^{1,2}, PENG Zhibiao³, RONG Jian^{1,2}, ZHOU Chenjing⁴, CHEN Kaiqun⁵

(1. Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering(Beijing University of Technology), Beijing 100124, China;

2. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. RIOH Traffic Safety Co., Ltd., Beijing 100088, China; 4. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 5. Guangxi Xinfazhan Communication Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

Abstract: To alleviate driving fatigue caused by driving on grassland roads, an anti-fatigue warning strategy based on information demand of individual drivers was designed. Based on the questionnaire, drivers were divided into three categories: visual type, auditory type and tactile type. Considering different types of drivers' customized warning information demand, three kinds of driving fatigue warning strategies on grassland roads were designed, including road warning, vehicle warning and vehicle-road cooperation warning. 21 drivers were selected to carry out driving simulator experiment. The data of KSS scale, subjective evaluation of warning strategy and driving behavior were obtained. The methods of descriptive analysis, statistical analysis and TOPSIS comprehensive evaluation based on entropy weight were applied to test the effectiveness of three driving fatigue warning strategies. The results shown that drivers' acceptance of the three warning strategies was high; these three warning strategies could alleviate the driving fatigue status in different degrees, the cooperative warning strategy was superior to the other two strategies. Moreover, the alleviation effect of the cooperative warning strategy was more obvious when the driving fatigue degree was deeper. The cooperative driving fatigue warning strategy based on customized information demand of individual drivers was helpful to improve the prevention effect of driving fatigue on grassland roads.

Keywords: traffic engineering; anti-fatigue strategy; cooperative warning; grassland highway; driving simulator

驾驶疲劳是诱发交通事故的主要原因之一。调查发现,约41%的驾驶人在驾驶过程中经历过不同程度的驾驶疲劳^[1]。在驾驶疲劳状态下,驾驶人注

意力分散,反应迟钝,无法及时有效控制车辆,难以避免潜在的交通事故风险。通常情况下驾驶疲劳造成的事故中人员伤亡和车辆损坏较大。根据统计数

收稿日期: 2022-06-07; 录用日期: 2022-08-22; 网络首发日期: 2024-06-04

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240603.1602.006>

基金项目: 广西壮族自治区交通运输厅科技示范工程项目

作者简介: 陈家源(1999—),男,硕士研究生;伍毅平(1990—),男,副教授,硕士生导师

通信作者: 伍毅平, wuyiping@bjut.edu.cn

据,疲劳驾驶造成的交通事故数量约占总事故数量的 10% ~ 20%;在特重大事故中,疲劳驾驶导致的交通事故比例高达 40%^[2]。与其他道路相比,草原公路具有环境单调、道路线形单一、交通量少等特点,是典型的单调驾驶环境。驾驶人在草原公路驾驶过程中视觉刺激少、驾驶操作少、精神负荷低,容易分散注意力,降低警惕性,造成驾驶疲劳累积导致被动疲劳^[3]。草原公路上由驾驶疲劳引发的重大事故数占事故总数的 70%^[4]。因此,给予草原公路行车驾驶人合理的疲劳预警防控策略具有重要意义。

按照技术方式不同,目前的驾驶疲劳防控策略可以分为路端预防^[5]和车端预防^[6]。路端预防策略主要包括优化道路线形和设置路侧预警设施(如疲劳预警标志、主题雕塑、车辆残骸)等。文献[7]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。文献[8]通过研究给出了在单调环境中缓解驾驶疲劳的景观设计建议刺激点间隔应设计为 5 min;当道路设计速度为 60 km/h 时,圆曲线半径宜设计为 250 m。文献[5]利用驾驶模拟技术评估了隆声带、V 形减速标线和可变信息标志缓解驾驶疲劳的效果。结果表明,3 种方法对驾驶人驾驶行为的影响差异不大,但均都能进一步提高驾驶人在车辆控制中的表现和警觉性。

车端预防策略主要基于车载驾驶疲劳预警设备开展,如声音预警、灯光预警、震动预警等。文献[9]介绍了一种座椅疲劳缓解系统并开展实际驾驶实验,记录驾驶人的脑电等数据,评估了该系统在单调驾驶环境下对于驾驶疲劳的缓解效果。文献[10]基于 PERCLOS 疲劳检测算法,利用眼动数据实现驾驶人疲劳状态检测,采用语音播报方式对驾驶人进行疲劳预警。文献[11]将长途汽车驾驶人疲劳状态分为清醒、疲劳、非常疲劳 3 个等级,建立了基于融合参数的 GM-HMM 疲劳检测模型,当驾驶人进入疲劳状态时系统采用警示灯及语音播报的方式进行预警。文献[12]通过智能手环获取驾驶人 ECG 数据,以 HRV 为驾驶疲劳检测指标,当检测到驾驶疲劳时,通过手环震动的方式提醒驾驶人注意休息。除此,车载驾驶疲劳预警设备也已在部分车辆实际应用,如大众的“驾驶疲劳识别系统”和沃尔沃的“驾驶员安全警告系统(DAC)”^[13]等。

虽然车端及路端驾驶疲劳预警防控策略在预防和缓解驾驶疲劳方面均取得了一定成效,但当前驾驶疲劳预警策略的研究多以单点及单一预警方式刺激为主,较少考虑驾驶人个体对预警策略的差异化信息需求以及不同预警手段的协同预警效用,以致当前驾驶疲劳预警设施及装备的针对性不强,在驾

驶疲劳预警和缓解方面还有较大提升空间。事实上,由于不同驾驶人有其自身的预警信息需求,有必要考虑驾驶人差异化预警信息需求从而设计更有效的驾驶疲劳预警策略,研究不同预警策略对草原公路单调环境所引发驾驶疲劳的缓解效用,以期提升草原公路驾驶疲劳预警防控效果。

因此,本研究根据驾驶人不同的预警信息需求对驾驶人进行分类,在易疲劳点设置路端防疲劳交通安全设施并对应在车端设计符合驾驶人预警信息需求偏好的预警策略,以期有效提升草原公路驾驶疲劳预警效果。具体地,以驾驶人易疲劳点为预警位置,考虑驾驶人视觉刺激设计路端防疲劳设施,基于驾驶人对预警信息需求的选择性偏好(视觉、听觉、触觉)设计车端预警设备,匹配形成车端路端协同的草原公路驾驶疲劳预警策略,并通过实验测试验证策略有效性。本研究采用在驾驶疲劳相关领域中广泛使用的驾驶模拟器开展实验测试。与现场实验相比,驾驶模拟器具有安全性高、成本低、条件可控制、数据采集方便等优点^[14]。综合采集驾驶人的 KSS 量表数据、主观问卷数据和驾驶行为数据,通过描述性分析、统计性分析和综合分析,研究车端路端协同预警策略的有效性。

1 驾驶人分类

不同驾驶人有其自身的预警需求偏好,单一的疲劳预警策略对不同驾驶人的疲劳缓解效果也不同。为满足驾驶人对预警信息的个性化需求,提升车端驾驶疲劳预警的有效性,本研究设计面向驾驶人差异化信息需求的疲劳预警策略。首先,依据应激反应理论^[15]和神经语言程序理论^[16]将驾驶人分为视觉型、听觉型和触觉型 3 种类型,并进行问卷测试,明确不同驾驶人的所属类型。

研究改进马斯洛需求层次理论^[17]各层级为感官体验需求、交互体验需求、情感体验需求、社会体验需求和个性体验需求。从驾驶人差异化预警需求角度,按照改进的马斯洛需求层次理论设计驾驶人类别调查问卷,包含视觉偏好问卷、听觉偏好问卷和触觉偏好问卷 3 个子问卷,每个层级设计两个问题共同反映该层级需求,共设计 40 道驾驶人需求偏好问题以判断驾驶人的所属类型。

为验证驾驶人类别问卷的有效性及合理性,通过网络问卷的方式开展调查,共获取 389 份有效样本的问卷数据,计算问卷的 Cronbach α 系数和 KMO 值均大于 0.9,通过信度和效度检验。开展驾驶模拟实验前,由被试填写驾驶人类别调查问卷,分别对视觉偏好、听觉偏好和触觉偏好 3 部分进行评分,根

据得分将被试划分为视觉型、听觉型或触觉型 3 类。

驾驶人分类流程主要包括确定层级权重、计算加权综合得分和划分驾驶人类型 3 部分。根据马斯洛需求层次理论,被试只有满足了低层级的基本需求后,才会考虑高层级需求。低层级需求会对高层级需求的选择产生影响,即层级越低其权重应该越大。研究利用结构方程中的直接影响分析和中介效应分析验证低层级需求对高层级需求的影响,并确定各层级权重见表 1。

表 1 问卷各层级权重

Tab. 1 Weight of each level of the questionnaire

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

得到各层级权重后,计算被试在各层级的得分,进而得到每个被试在视觉、听觉和触觉 3 个子问卷中的综合得分,计算公式为

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

(1)

$$A_m = \sum_{l=1}^5 a_{m-l}$$

(2)

式中: a_{m-l} 为在第 m 个问卷中第 l 层的加权分值, N_{m-li} 为在第 m 个问卷中第 l 个层级中第 i 个问题的分值, W_l 为第 l 层级权重, A_m 为在第 m 个问卷中的综合得分。

计算得到所有被试在各问卷中的加权综合得分后,首先判断被试是否满足类型划分标准。定义综

合得分判断阈值 $\delta=7$,各问卷加权后总分为 10。仅当被试至少有一个子问卷 A_m 大于 7 时方可参与类型划分,否则不对其划分类型,即被试对某子问卷的评分占总分的 70% 以上时才能说明被试对该刺激类型的偏好是有效的。

在去除无法分类被试后,若被试仅有一项 $A_m > 7$,则被试类型为第 m 类;若至少有两项 $A_m > 7$,则进一步比较 A_m 大小,被试类型为 A_m 最大值所对应类型;若至少有两项 $A_m > 7$,且最大 A_m 值相等,则进一步比较 a_{m-l} 分值大小,从最低层级开始比较,直至出现差异,被试类型为 a_{m-l} 较大值所属类型,若 a_{m-l} 均相同,则被试类型为最后刺激类型偏好选择的类型。

2 驾驶疲劳预警策略设计

2.1 草原公路驾驶易疲劳点确定

合理的预警时机是保障预警策略有效性的关键因素之一。根据前期研究结论,虽然不同驾驶人的驾驶疲劳状态累积过程不完全一致,但其变化特征具有一定规律性,前期研究基于驾驶模拟实验采集驾驶人连续行车过程行为数据,通过特征挖掘和聚类分析并结合物元模型得到清醒、轻度疲劳、中度疲劳和重度疲劳 4 种模式下的驾驶疲劳状态累积过程曲线,如图 1 所示,驾驶疲劳等级 $0 \sim <1$ 为清醒, $1 \sim <2$ 为轻度疲劳, $2 \sim <3$ 为中度疲劳, $3 \sim 4$ 为重度疲劳。根据曲线获得易疲劳点作为驾驶疲劳预警策略的预警时机,详细研究经过见文献[18]。

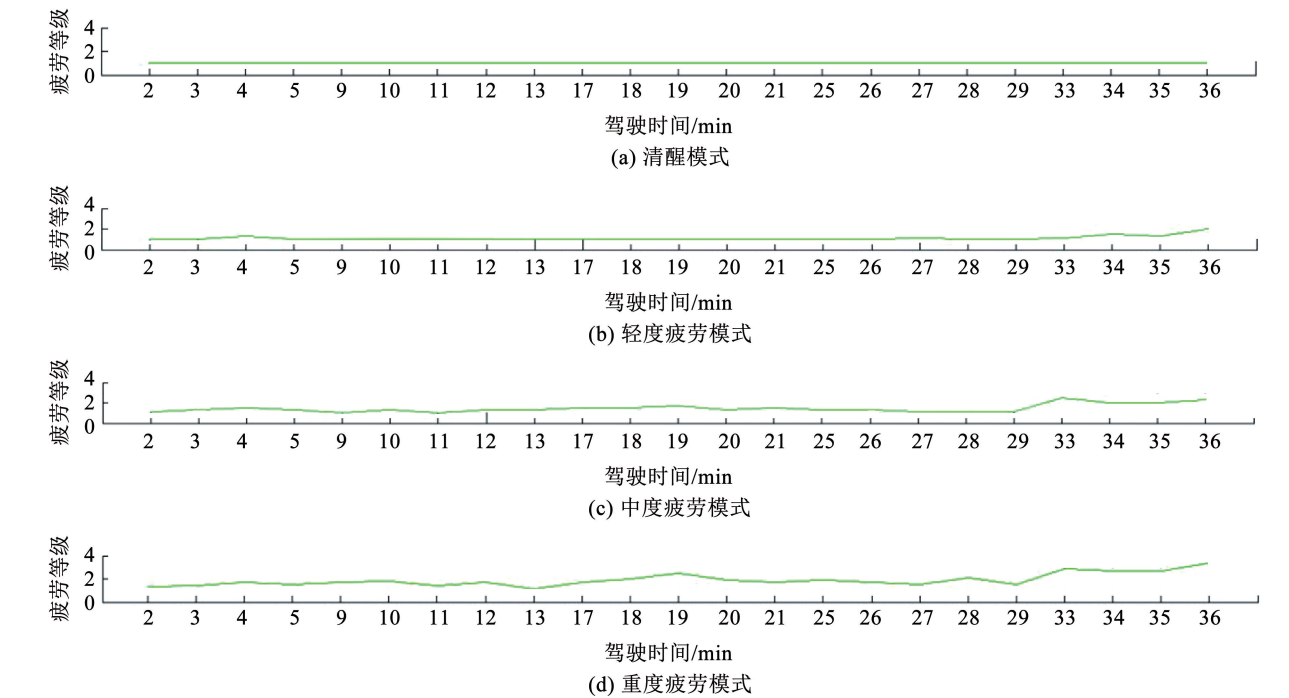


图 1 不同模式下的驾驶疲劳状态累积过程

Fig. 1 The generation process of driving fatigue for different patterns

由图 1 可知:1)在轻度疲劳模式下,驾驶人整体驾驶疲劳程度较低,在第 33 分钟之前基本处于清醒状态,因疲劳累积,33 min 后开始出现轻微疲劳;2)在中度疲劳模式下,整体疲劳程度增加,在第 33 分钟前虽有疲劳产生,但驾驶人通过自我调节缓解了疲劳程度的加深,由于疲劳没有完全消解而是持续积累,在第 33 分钟时疲劳程度迅速增加;3)在重度疲劳模式下,整体疲劳程度最深,在第 19 分钟时表现出第 1 次疲劳,但驾驶人通过自我调节缓解了部分疲劳,然而驾驶疲劳随着时间的推移而累积,在第 33 分钟时再次表现出疲劳,且疲劳程度加深。因此,综合确定草原公路中易疲劳点为连续驾驶时的第 19 分钟和第 33 分钟,并将这两个易疲劳点作为驾驶疲劳预警策略的预警时机。

2.2 路端驾驶疲劳预警策略设计

针对草原公路环境单调的特点,可以考虑从驾

驶人视觉刺激的角度设计路端驾驶疲劳预警策略^[8]。本研究从变化和增加色彩的角度设计路端驾驶疲劳预警设施。有关探究不同颜色路面对于驾驶行为影响效果的研究表明,黄色和红色对驾驶行为改善效果、视觉诱导性和警觉性最好,灰色和黑色效果最差,绿色和蓝色达到的效果介于上述两类之间^[19]。

结合国道 210 的工程实际应用经验,设计了一种彩色防滑道面与路肩黄色导流线作为路端疲劳预警设施,如图 2 所示。彩色防滑道面与路肩黄色导流线由红、黄、蓝、绿 4 块彩色路面铺装组成(全长 120 m),并在路肩辅助铺装黄色导流线(50 m),与草原公路单调环境形成色彩对比,以增强对驾驶人的视觉刺激从而缓解驾驶疲劳程度。在本研究中,彩色防滑道面与路肩黄色导流线铺装于易疲劳点位置。

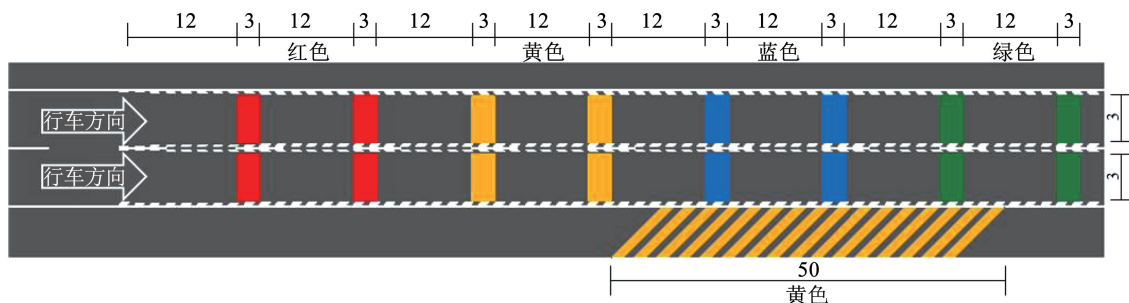


图 2 彩色防滑道面与路肩黄色导流线(m)

Fig. 2 The colored anti-skid pavements on the lane and yellow guide line on the shoulder(m)

2.3 车端驾驶疲劳预警策略设计

在车载预警设备方面,面向不同类型驾驶人的视觉、听觉以及触觉预警需求,设计满足不同驾驶人信息需求的车端驾驶疲劳预警设备^[20]。

其中,视觉型驾驶人,研究采用红色 LED 闪烁灯(闪烁灯亮度和闪烁频率适中,不会对驾驶人产生炫目等危害);听觉型驾驶人采用语音播报器;触觉型驾驶人采用震动手环,如图 3 所示。车端预警时间与路端预警保持一致。根据彩色防滑道面与路肩黄色导流线长度和驾驶人可视距离计算,在车速为 100 km/h 时,其预警时长为 9 s,因此设计车端驾驶疲劳预警时长为 9 s。

2.4 车端与路端协同预警策略设计

结合上述车端与路端预警策略,本研究设计了草原公路车端与路端协同预警策略。其中,车端预警中视觉型预警采用中控台红色 LED 灯,易疲劳点 1 设置 1 Hz,易疲劳点 2 设置 2 Hz;听觉型预警采用音响语音播报,易疲劳点 1 设置男女声交替 3 次,每次间隔 1 s(“您已处于驾驶疲劳高发期,请小心驾驶”),声音强度为 65 dB,易疲劳点 2 设置男女声交

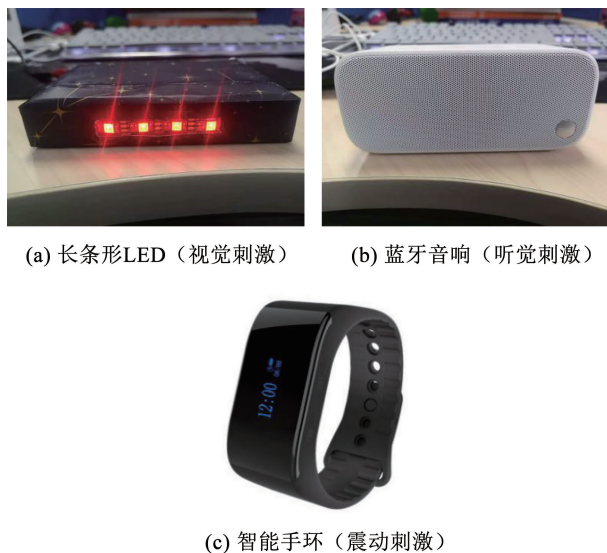


图 3 车载驾驶疲劳预警设备

Fig. 3 In-vehicle driving fatigue warning equipment

替 3 次,每次间隔 1 s(“您已处于驾驶疲劳高发期,请小心驾驶”),声音强度为 70 dB;触觉型预警采用手环震动,易疲劳点 1 设置 1 Hz,易疲劳点 2 设置 2 Hz。预警时长均为 9 s。路端预警采用彩色防滑

道面与路肩黄色导流线,两次预警中设施设计参数一致。选择在草原公路连续行驶至第 19 分钟和第 33 分钟的时刻进行车端和路端预警。由于两个疲劳时刻驾驶人疲劳状态不同,车载预警设备参数不同,疲劳程度越大,预警强度越大。

3 防疲劳策略效果验证实验

3.1 被试及实验设备

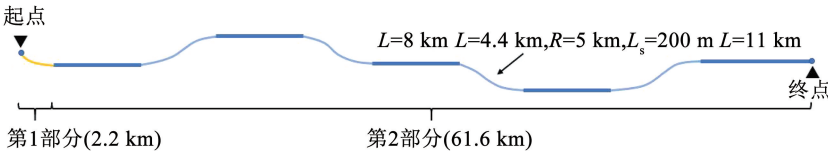
研究公开招募具有 C 级驾照的驾驶人以获得实验被试。根据被试填写的驾驶人分类问卷在视觉偏好、听觉偏好和触觉偏好 3 个部分的得分,将驾驶人划分为视觉型、听觉型和触觉型 3 类。

通过招募和问卷测试,最终选取 21 名驾驶人(12 名男驾驶人和 9 名女驾驶人)参加驾驶模拟实验,其中视觉型驾驶人、听觉型驾驶人和触觉型驾驶人各 7 人。被试年龄为 22~56 岁($AVG=36,SD=9$),驾龄为 2~30 a($AVG=12,SD=10$)。实验前所有被试均提供了书面知情同意书,被试自述实验前 24 h 内没有睡眠障碍,没有服用任何药物,也无饮酒、喝咖啡或喝茶。

利用北京工业大学驾驶模拟平台进行驾驶模拟实验验证疲劳预警策略效果。该平台可以模拟和产生视觉、听觉及触觉等感官效应,驾驶模拟器数据采集频率为 1 Hz。



(a) 草原公路驾驶模拟环境



(b) 道路线形

图 4 驾驶模拟实验环境及道路线形

Fig. 4 Environment and road alignment of the driving simulator experiment

3.3 实验流程

实验由 4 部分组成:1) 驾前问卷。在进行客观实验之前,所有被试均被要求完成一份主观问卷。除个人基本信息外,还包括被试的健康及生心理状态,以及被试的睡眠和醒来时间等。有睡眠相关障碍或前一晚睡眠时间少于 6 h、感到疲倦、昏昏欲睡,在实验前 24 h 内饮酒、咖啡或茶的被试不得参与实验。2) 预实验。预实验约 5 min,用于被试熟悉驾驶模拟器操作和实验过程,避免因被试对模拟器操作或实验流程不熟悉而导致实验数据偏差。3) 正式实验。研究使用卡洛琳斯卡嗜睡量表(KSS 量表)^[23]评估被试当前疲劳状态。等级 1 表示极度清醒;等级 2 表示非常清醒;等级 3 表示清醒;等级 4 表示有些清醒;等级 5 表示既不清醒也不疲劳;等级 6 表示开始出现疲劳征兆;等级 7 表示疲劳,不用

3.2 实验场景

实验基本路段为具有典型草原地区特征的双向 4 车道一级公路,如图 4(a) 所示。道路横断面由路肩(3 m)、行车道(3.75 m)和中央隔离带(2 m)组成。道路线形由长直线和大半径反向圆曲线组成,如图 4(b) 所示。所有直线和曲线的设计指标保持一致,符合《公路工程技术标准》(JTG B01—2014)的设计要求,并且确保转弯半径不会对驾驶人疲劳状态造成影响^[21]。实验道路分为两个部分:第 1 部分用于车辆加速到期望速度进入实验状态,第 2 部分为正式实验路段。研究表明,在单调的环境下,驾驶疲劳状态能很快出现(约 30 min)^[22]。因此,各场景正式实验路段的长度设计为 61.6 km,预计行驶时间为 37 min(速度为 100 km/h)。

实验道路两侧均为连续的草原场景,天气晴朗。同时,交通流处于自由流状态,实验过程中有 5 辆车随机分布在实验车周围,最高限速为 100 km/h。

本次实验设计 4 个场景:1) 第 1 个场景给予驾驶人单一路端预警;2) 第 2 个场景为单一车端预警;3) 第 3 个场景为车端路端协同预警;4) 第 4 个场景为空白对照组,场景中没有任何疲劳预警策略。在前 3 个场景中,预警时刻均为易疲劳点 1 和易疲劳点 2(自正式实验开始后的第 19 分钟和第 33 分钟)。

努力来保持清醒;等级 8 表示疲劳,用一些努力来保持清醒;等级 9 表示昏昏欲睡,用巨大努力来保持清醒。被试驾驶模拟车辆行驶前,首先对照 KSS 量表评估自身当前疲劳状态。在正式实验中,要求被试在右侧车道按照自己的驾驶习惯行驶,并禁止超车和超速行为,以营造更加单调的驾驶任务。在实验场景 1、场景 2 和场景 3,当被试行驶至第 19 分钟和第 33 分钟时,分别给予被试对应疲劳预警策略。4) 驾后问卷。实验结束后,每名被试再次对照 KSS 量表评估自身当前疲劳状态,并评价驾驶模拟器和实验场景的真实性,从信号理解度、烦扰度、预警效果和接受程度 4 个方面对实验过程中所接受的预警策略进行评分。评分根据李克特五级量表设计,评分为 1~5 分(1 分为最差,5 分为最好)。

实验中被试实验场景顺序随机排列。为消除场

景间的相互干扰,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。被试每次完成两个实验场景,需前后参加两次实验以完成 4 个实验场景,两次实验至少间隔半天时间。驾驶模拟实验安排在早上 8:00 时到晚上 10:00 时,具体分为 3 个时间段:早上 8:00 时到 12:00 时,下午 13:00 时到 17:00 时,晚上 18:00 时到 22:00 时。每次驾驶模拟实验前,被试均处于清醒状态。

3.4 数据获取与处理

21 名被试的驾驶行为和主观问卷数据均被完整记录。主观数据主要为被试的 KSS 量表值和对预警策略在信号理解度、烦扰度、预警效果和接受程度 4 个方面的评分。客观数据为基于驾驶模拟实验采集的被试连续驾驶行为数据,包括速度 v 、加速度 a 、横向偏移 L_p 、方向盘转角 A_{sw} 以及油门功效 P_{Ap} 。

分别提取被试 4 个场景中正常驾驶段、第 1 次预警段和第 2 次预警段的驾驶行为数据并计算各自的统计类指标、波峰波谷类指标、线下面积类指标、时间窗类指标和横向移动速度类指标,结合皮尔逊相关性分析和主成分分析,构建 v 、 a 、 L_p 和 P_{Ap} 4 个指标群的综合有效特征指标,即速度特征值 v_{ev} 、加速度特征值 a_{ev} 、横向偏移特征值 L_{Pev} 和油门功效特征值 P_{APev} ,分别如式(3)~(6)所示。

$$v_{ev} = 0.509X_{11} + 0.509X_{12} \quad (3)$$

$$a_{ev} = 0.338X_{21} + 0.342X_{22} + 0.336X_{23} \quad (4)$$

$$L_{Pev} = 0.173X_{31} + 0.172X_{32} + 0.184X_{33} + 0.198X_{34} + 0.188X_{35} + 0.192X_{36} \quad (5)$$

$$P_{APev} = 0.551X_{41} + 0.551X_{42} \quad (6)$$

式中: X_{11} 为速度极差, m/s; X_{12} 为速度时间窗标准差, m/s; X_{21} 为加速度原始标准差, m/s²; X_{22} 为加速度绝对均值, m/s²; X_{23} 为加速度曲线线下面积, m/s²; X_{31} 为横向偏移标准差, m; X_{32} 为横向偏移极差, m; X_{33} 为横向偏移绝对值均值, m; X_{34} 为横向偏移绝对值极大值, m; X_{35} 为横向偏移波峰波谷绝对均值, m; X_{36} 为横向偏移曲线线下面积, m; X_{41} 为油门功效曲线线下面积, 无量纲; X_{42} 为油门功效时间窗标准差, 无量纲。

参照车载预警策略触发时车辆所行驶的距离,数据提取长度定为 250 m。其中,正常驾驶段为场景第 2 部分车辆正常行驶 1 min 后的 250 m。

4 实验结果分析

4.1 KSS 量表值

因长时间驾驶导致驾驶人疲劳累积,疲劳预警

策略虽可以缓解驾驶疲劳但无法完全消除疲劳,故可基于 KSS 量表获取的被试自身疲劳状态,利用实验后状态评价 K_2 与实验前状态值 K_1 的变化值 ΔK ($\Delta K = K_2 - K_1$) 反应预警策略缓解疲劳程度的效果, ΔK 越小说明预警效果越好。不同预警模式下疲劳状态变化值 ΔK 如图 5 所示, ΔK 由大到小依次为路端预警(2.50)、车端预警(2.36)、车端路端协同预警(1.91)。重复测量方差分析结果表明 3 种预警方式的 ΔK 不具有显著性差异 ($F_{(2,40)} = 1.292, P = 0.285 > 0.1$)。因此,驾驶人认为 3 种预警方式对自身疲劳状态缓解方面没有显著差别,协同预警稍好于其他两种方式。

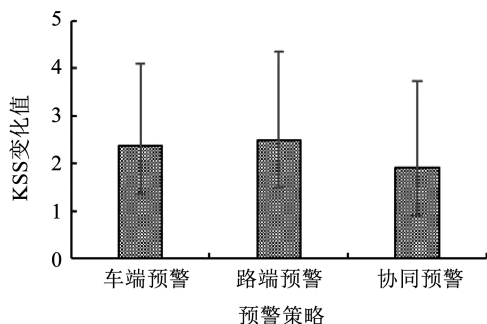


图 5 实验前后 KSS 变化值

Fig. 5 Change value of KSS before and after experiments

4.2 主观评价结果

通过被试对信号理解、烦扰度、预警效果和接受程度的评分从主观层面反应驾驶疲劳预警策略的有效性。

1) 信号理解。被试对 3 种预警策略的理解程度评分如图 6 所示,由高向低依次为协同预警、路端预警、车端预警。重复测量方差分析结果表明被试对 3 种预警策略的信号理解程度评分不具有显著性差异 ($F_{(2,40)} = 1.386, P = 0.262 > 0.1$)。因此,增加预警方式并没有引起被试对疲劳预警信号理解程度的显著变化。

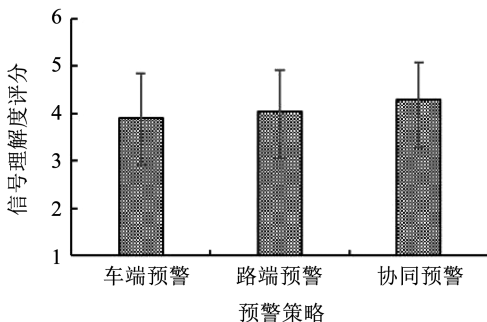


图 6 信号理解度评分

Fig. 6 Evaluation score for signal comprehension

2) 烦扰度。被试对3种预警策略的烦扰度评分如图7所示,车端路端协同预警的烦扰度评分略高于单一路端预警和车端预警,但重复测量方差分析结果表明3种预警策略之间的烦扰度评分不具有显著性差异($F_{(2,40)} = 1.778, P = 0.182 > 0.1$)。因此,增加疲劳预警手段对驾驶人的烦扰度并无显著影响。

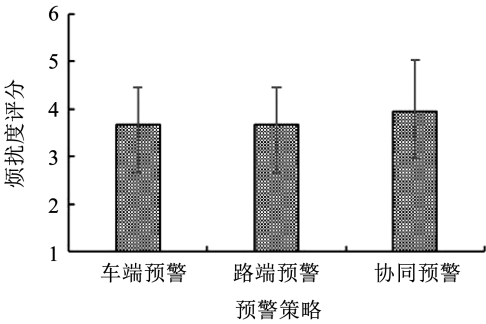


图7 烦扰度评分

Fig. 7 Evaluation score for annoyance degree

3) 预警效果。被试对3种预警策略的预警效果评分如图8所示(*表示 $P < 0.1$),协同预警的预警效果评分高于单独的车端和路端预警。重复测量方差分析结果显示,3种预警策略的预警效果评分具有显著性差异($F_{(2,40)} = 2.816, P = 0.072 < 0.1$)。事后多重比较分析结果表明,被试对协同预警的预警效果评分显著高于车端预警($P = 0.011 < 0.1$),其他策略之间不具有显著性差异。因此,驾驶人认为增加驾驶疲劳预警手段有助于提升防疲劳预警效果。

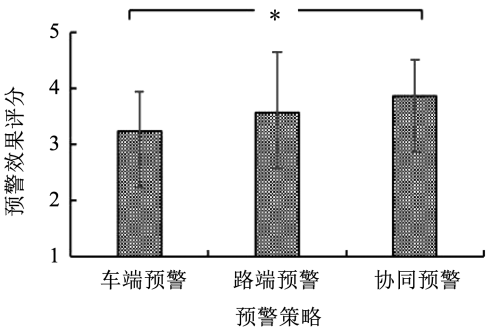


图8 预警效果评分

Fig. 8 Evaluation score for warning effect

4) 接受程度。被试对3种预警策略的接受程度评分如图9所示,被试对协同预警策略的接受程度评分略高于其他两种,但重复测量方差分析结果表明3种预警策略的接受程度评分并无显著性差异($F_{(2,40)} = 1.204, P = 0.311 > 0.1$),驾驶人对单一和协同的驾驶疲劳预警策略的接受程度均较高。

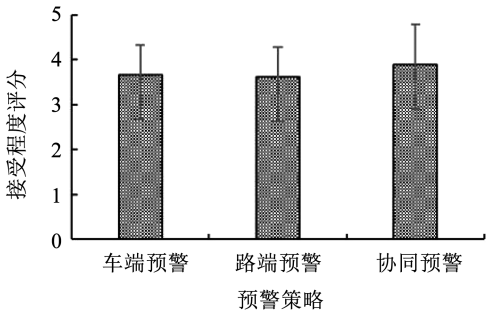


图9 接受度评分

Fig. 9 Evaluation score for acceptance degree

4.3 驾驶行为特征

4.3.1 描述性分析

分别提取4个场景中正常驾驶段、第1次预警段和第2次预警段的 v_{ev} 、 a_{ev} 、 L_{Pev} 、 P_{APev} 4项驾驶疲劳综合指标。为了更好地体现预警策略的防疲劳效果,选用综合指标变化值展开分析,计算方法如式(7)所示。特征值变化值越大,说明与清醒状态相比综合指标值增加越多,被试疲劳程度越高,预警策略对驾驶疲劳的缓解效果越差。

Δ_{m-ij} = 1/n ∑_{k=1}ⁿ (a_{m-k-ij} - b_{m-k-i}) (7)

式中:Δ_{m-ij}为在第m个预警策略下第j次预警时第i项综合指标的变化值(m=1、2、3、4,分别代表空白组、车端预警组、路端预警组、车端路端协同预警组;i=1、2、3、4;j=1、2),无量纲;a_{m-k-ij}为在第m个预警策略下第k个被试的第i项指标在第j次预警时的特征值,无量纲;b_{m-k-i}为在第m个预警策略下第k个被试的第i项指标在清醒标准段中的特征值,无量纲;n为每种预警策略的被试总数。

两次预警的4项综合指标变化值计算结果见表2,路端预警、车端预警以及协同预警的综合指标变化值均小于空白组,说明3种预警策略均能在一定程度上缓解驾驶疲劳。其中,协同预警对应的变化值最小,即缓解驾驶疲劳的效果更优。

4.3.2 差异性统计分析

通过非参数独立样本K-S检验对不同预警策略对应的综合指标变化值的差异性进行显著性分析,结果见表3。可以看出,与空白组相比,3种预警策略均在不同指标下表现出了一定的显著作用,即3种预警策略均能在一定程度上显著改变疲劳状态下驾驶人对车辆的控制能力。其中,协同预警方式与空白组相比表现出的显著性指标最多,对疲劳缓解效果更好。此外,协同预警与车端预警和路端预警相比,在 v_{ev} 、 L_{Pev} 和 P_{APev} 综合指标中均表现出了一定的显著性差异,尤其是 v_{ev} 综合指标。因此,3种预警策略均可以在一定程度上有效缓解驾驶疲劳,其中车端路端协同预警对驾驶疲劳的改善效果更好。

表 2 综合指标变化值描述

Tab.2 Descriptive results of the comprehensive index of the change values

预警次序	预警策略	统计量	综合指标变化值			
			$\Delta_{v_{ev}}$	$\Delta_{a_{ev}}$	$\Delta_{L_{Pev}}$	$\Delta_{P_{APev}}$
第 1 次预警	车端	均值	0.335	0.204	1.137	0.094
		标准差	2.905	1.081	2.767	0.620
	路端	均值	0.356	0.185	1.250	0.051
		标准差	1.961	1.293	3.280	0.779
	协同	均值	0.338	0.148	0.926	0.039
		标准差	2.959	1.247	0.469	0.130
	空白组	均值	0.554	0.442	1.693	0.139
		标准差	1.596	0.427	3.123	0.583
第 2 次预警	车端	均值	1.106	0.179	1.793	0.050
		标准差	3.353	1.639	2.349	0.627
	路端	均值	0.920	0.145	1.728	0.060
		标准差	1.224	1.083	2.990	1.323
	协同	均值	0.264	0.106	1.248	0.027
		标准差	1.871	0.729	0.749	0.972
	空白组	均值	1.663	0.314	2.569	0.097
		标准差	2.514	0.943	2.452	0.439

表 3 不同预警策略影响下的综合指标变化值的统计分析结果

Tab.3 Statistical results of the change values of comprehensive index under the influence of different warning strategies

预警次序	预警策略	对比项	显著性			
			v_{ev}	a_{ev}	L_{Pev}	P_{APev}
第 1 次预警	车端	路端	0.617	0.521	0.443	0.385
		协同	0.001 * *	0.297	0.365	0.566
		空白	0.747	0.020 * *	0.434	0.938
	路端	车端	0.617	0.521	0.443	0.385
		协同	0.002 * *	0.566	0.885	0.008 * *
		空白	0.814	0.008 * *	0.886	0.645
	协同	车端	0.001 * *	0.297	0.365	0.566
		路端	0.002 * *	0.566	0.885	0.008 * *
		空白	0.013 * *	0.004 * *	0.808	0.172
	空白	车端	0.747	0.020 * *	0.434	0.938
		路端	0.814	0.008 * *	0.886	0.645
		协同	0.013 * *	0.004 * *	0.808	0.172
第 2 次预警	车端	路端	0.841	0.883	0.082 *	0.329
		协同	0.023 * *	0.819	0.329	0.632
		空白	0.369	0.329	0.819	0.565
	路端	车端	0.841	0.883	0.082 *	0.329
		协同	0.013 * *	0.819	0.560	0.082 *
		空白	0.678	0.172	0.082 *	0.06 *
	协同	车端	0.023 * *	0.819	0.329	0.632
		路端	0.013 * *	0.819	0.560	0.082 *
		空白	0.002 * *	0.329	0.081 *	0.883
	空白	车端	0.369	0.329	0.819	0.565
		路端	0.678	0.172	0.082 *	0.06 *
		协同	0.002 * *	0.329	0.081 *	0.883

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

4.3.3 变异系数分析

为进一步对比不同预警策略缓解驾驶疲劳的效果,研究提出变异系数以量化和更加直观刻画不同预警策略对各综合指标的影响,计算方法如式(8)、(9)所示,其中“blank”为空白组。变异系数越小表明预警策略效果越好。

$$Z_{m-ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (\Delta_{\text{blank}-k-ij} - \Delta_{m-k-ij}) \quad (8)$$

式中: Z_{m-ij} 为空白组与预警组在第 m 个预警策略下在第 j 次刺激时第 i 个综合指标变化值的差值,无量纲; $\Delta_{\text{blank}-k-ij}$ 为第 k 个被试在空白组中第 j 次预警时第 i 个指标的特征值,无量纲; Δ_{m-k-ij} 为第 k 个被试

在第 m 个预警策略第 j 次刺激时第 i 个指标的特征值($m=1,2,3$),无量纲。

$$\gamma_{m-ij} = \frac{\delta_{m-ij}}{Z_{m-ij}} \quad (9)$$

式中: γ_{m-ij} 为第 m 个预警策略下第 j 次预警时第 i 个综合指标的变异系数,无量纲; δ_{m-ij} 为空白组与预警组在第 m 个预警策略下在第 j 次预警时第 i 个指标特征值差值的标准差,无量纲。

首先,根据式(8)计算得到空白组与预警组各综合指标变化值的差值,计算结果见表 4。

表 4 空白组与预警组各综合指标变化值的差值

Tab. 4 Difference of the change value of each comprehensive index between blank group and stimulation group

预警次序	预警策略	统计量	综合指标变化值差值			
			$Z_{v_{ev}}$	$Z_{a_{ev}}$	$Z_{L_{Pev}}$	$Z_{P_{APev}}$
第 1 次预警	车端	均值	0.219	0.238	0.556	0.045
		标准差	3.954	1.043	3.150	0.751
	路端	均值	0.199	0.256	0.634	0.088
		标准差	3.676	1.362	3.060	0.925
	协同	均值	0.216	0.294	0.767	0.100
		标准差	3.127	1.305	3.404	0.558
第 2 次预警	车端	均值	0.647	0.127	0.791	0.051
		标准差	3.152	2.001	3.346	0.871
	路端	均值	0.781	0.173	0.937	0.059
		标准差	4.091	1.556	2.765	1.588
	协同	均值	1.399	0.208	1.321	0.070
		标准差	2.735	1.171	3.557	1.181

利用式(9)计算各指标变异值,计算结果如图 10(a)、10(b)所示。在两次预警中,变异系数由车端预警、路端预警到协同预警整体呈下降趋势。除在第 1 次预警中 a_{ev} 综合指标的变异系数外,其余指标的变异系数对应协同预警方式均为最小值。计算不同预警策略下各指标变异系数均值,计算结果如图 10(c)所示。在两次预警中,相比于车端预警和路端预警,协同预警的变异系数均为最小值。因此,进一步说明协同预警对疲劳预警和缓解的效果以及效果稳定性最好,能普遍提高疲劳状态下驾驶人对车辆的控制能力。

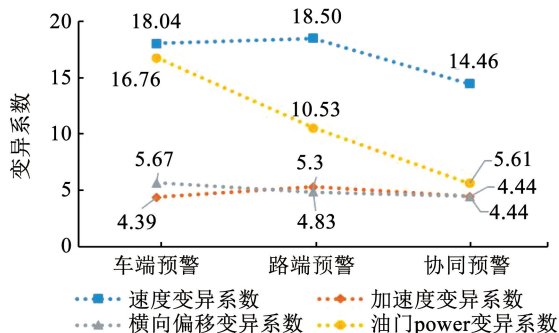
4.3.4 综合评价

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综合指标变化值(Δ_{m-ij}),引入基于熵权的 TOPSIS 综合评价方法,对比 3 种预警策略的综合效果。TOPSIS 是在有限方案多目标决策分析中常用的一种科学方法,通过计算评价对象与最

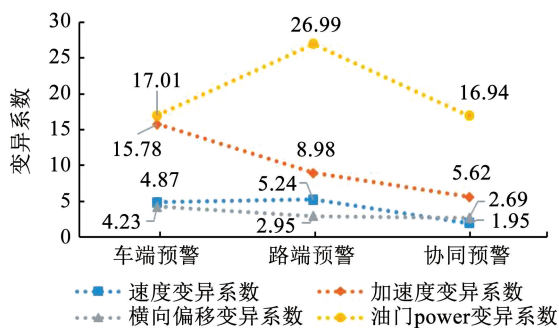
优目标之间的欧氏距离对评价对象进行相对优劣评价^[24]。基于熵权法计算得到在两次刺激下,4 项指标 $\Delta_{v_{ev}}$ 、 $\Delta_{a_{ev}}$ 、 $\Delta_{L_{Pev}}$ 、 $\Delta_{P_{APev}}$ 的权重分别为 0.388、0.251、0.163、0.198 和 0.205、0.311、0.242、0.242。基于 TOPSIS 的综合评价结果如图 11 所示。

在两次预警中,3 种预警策略的 TOPSIS 综合评价价值均高于空白组,说明在两个预警点 3 种预警策略均能起到缓解驾驶疲劳的作用。其中,协同预警的 TOPSIS 综合评价价值均为最大,表明其效果为最优。值得注意的是,一方面,路端预警 TOPSIS 综合评价价值均高于车端,说明路端预警效果优于车端预警,该结果与实验中职业司机对两种预警方式有效性的主观评价一致。虽然当前智能辅助设备的应用已十分广泛,但在职业司机的经验认知中,路端防疲劳设施的效果要好于车载驾驶疲劳预警设备。另一方面,在第 2 次预警中,3 种预警策略的 TOPSIS 综合评价差值均大于第 1 次预警。造成该结果的原因是,在第 1 次预警时被试疲劳程度较低,3 种预警策

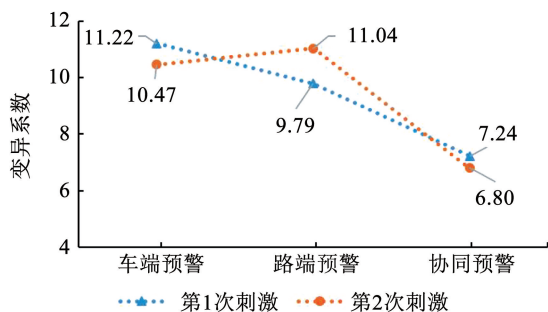
略的预警效果差异不大。但在第2个预警点时,被试疲劳程度增加,协同预警对驾驶疲劳缓解效果更显著,而单一路端和车端预警的刺激较小。在疲劳程度较大的条件下,协同预警在缓解驾驶疲劳方面的优势被突显出来。



(a) 第1次预警变异系数



(b) 第2次预警变异系数



(c) 变异系数均值

图10 不同预警模式下综合指标值变异系数

Fig. 10 Variation coefficient of comprehensive index values under different warning modes

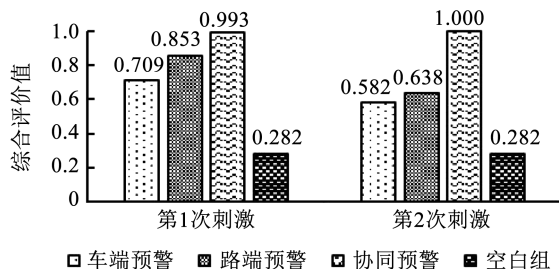


图11 基于TOPSIS的综合评价价值

Fig. 11 Comprehensive evaluation values based on TOPSIS

5 结论

1) 基于不同预警信息需求的驾驶人分类,从路端视觉刺激和车端预警偏好两个维度设计了路端预警、车端预警和车端路端协同预警3种草原公路驾驶疲劳预警策略,利用驾驶模拟实验从主观与客观两个方面验证了驾驶疲劳预警策略的有效性。

2) 3种驾驶疲劳预警策略均可以不同程度地缓解驾驶疲劳状态。与单一预警策略相比,虽然协同预警增加了信息量,但驾驶人烦扰度评价和接受度评价并无显著差异(烦扰度 $F_{(2,40)} = 1.778, P = 0.182 > 0.1$; 接收程度 $F_{(2,40)} = 1.204, P = 0.311 > 0.1$)。协同预警对驾驶疲劳缓解效果优于车端或路端单独预警(车端为3.23;路端为3.57;协同为3.86),能显著改善驾驶疲劳状态下的驾驶行为(协同预警TOPSIS综合评分为0.993和1.0,均为3种预警策略中最高值)。并且,随着驾驶人疲劳程度加深,车端和路端协同预警策略的效果更显著。研究提出的个性化车端路端协同防疲劳预警策略为有效缓解草原公路驾驶疲劳提供了新的方法支撑。

3) 本文主要基于驾驶人主观评价和驾驶行为数据分析不同驾驶疲劳预警策略的有效性,有必要综合考虑脑电、心电和眼动数据等对实验结果进行验证。在车端预警层面,可进一步对比分析3类驾驶人对应不同车端预警策略的效果。同时,有必要结合不同驾驶人类型和昼夜节律等进一步优化疲劳预警策略。另外,驾驶模拟实验在分析疲劳预警策略绝对效用方面存在局限,在条件允许的情况下还需开展实车测试。除此,草原天气复杂多变,天气条件对驾驶疲劳预警策略的影响同样值得探讨。

参考文献

- [1] 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
- [2] 熊睿, 邓院昌. 疲劳驾驶交通事故的严重程度影响因素分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(4): 20
- XIONG Rui, DENG Yuanchang. Analysis on factors affecting severity of traffic accidents caused by fatigue driving[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(4): 20
- [3] 阎莹, 袁华智, 杨香丽, 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
- YAN Ying, YUAN Huazhi, YANG Xiangli, et al. Relationship model of monotonous road environment and driving fatigue based on multi-source data[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(5): 156. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.05.015
- [4] 李先锋, 陈剑威, 张广, 等. 草原地区一级公路交通事故分析[J]. 交通标准化, 2007(12): 174

LI Xianfeng, CHEN Jianwei, ZHANG Guang, et al. Analysis of traffic accident of Grade-I highway in prairie region [J]. Communications Standardization, 2007(12): 174

[5] MERAT N, JAMSON A H. The effect of three low-cost engineering treatments on driver fatigue: a driving simulator study[J]. Accident Analysis & Prevention, 2013, 50: 8

[6] 李照, 舒志兵. 基于 DSP 的驾驶员疲劳实时预警系统设计[J]. 控制工程, 2019, 26(1): 92

LI Zhao, SHU Zhibing. Design of driver fatigue real-time early warning system based on DSP [J]. Control Engineering of China, 2019, 26(1): 92. DOI:10.14107/j.cnki.kzgc.161380

[7] 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

[8] 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

MAO Kejun. Research on mechanism and countermeasure of driver fatigue: effects of road environment monotony [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011

[9] SCHNEIDER L, FRINGS K, ROTHE S, et al. Effects of a seat-integrated mobilization system during passive driver fatigue [J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 150: 105883

[10] 张驰. 高危车辆驾驶员疲劳驾驶监测及预警系统研究 [D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2018

ZHANG Chi. Research on fatigue driving monitoring and early warning system of high-risk vehicle drivers [D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2018

[11] 柴萌. 长途客车驾驶员疲劳状态辨识与预警 [D]. 长春: 吉林大学, 2019

CHAI Meng. Identification and early warning of fatigue state of long-distance bus driver [D]. Changchun: Jilin University, 2019

[12] 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, 2017

LI Xiuyan. Research on fatigue driving warning mechanism and equipment design for truck drivers [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017

[13] 汽车之家. 疲劳监测系统 [EB/OL]. (2017-03-03). http://car.autohome.com.cn/shuyu/detail_16_17_911.html

[14] WANG Xuesong, XU Chuan. Driver drowsiness detection based on non-intrusive metrics considering individual specifics [J]. Accident Analysis & Prevention, 2016, 95(1): 350

[15] 张雅丽, 袁伟, 付锐, 等. 驾驶人应激反应能力强化培训方法 [J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(5): 24

ZHANG Yali, YUAN Wei, FU Rui, et al. Research on training method for enhancing driver's stress response ability [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(5): 24. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2018.05.005

[16] LIU Fangqing, HUANG Han, YANG Zhongming, et al. Search-based algorithm with scatter search strategy for automated test case generation of NLP toolkit [J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2019, 5(3): 491

[17] 丁淑巍, 蒋松利, 邢哲魁, 等. 高速公路服务区发展方向及实施建议 [J]. 公路, 2019, 64(6): 199

DING Shuwei, JIANG Songli, XING Zhekui, et al. Development direction and implementation suggestions of expressway service area [J]. Highway, 2019, 64(6): 199

[18] PENG Zhibiao, RONG Jian, WU Yiping, 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. DOI: 10.1177/0361198121998351

[19] 卓曦, 唐璐璐, 王家主, 等. 彩色路面环境下隧道视觉诱导性评价 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 417

ZHUO Xi, TANG Lulu, WANG Jiazhui, et al. Visual inductivity evaluation for tunnels with colored pavements [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2019, 47(3): 417

[20] 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

LI Jiawen. Research on warning method adaptive to driver drowsiness and traffic environment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011

[21] 交通部公路局中国工程建设标准化协会公路工程委员会. 公路工程技术标准 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2004

Highway Engineering Committee of China Engineering Construction Standardization Association. Technical standards for highway engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2004

[22] 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(2): 640

[23] 孙瑞山, 陈毅, 孙立斌. 基于 CFF 的管制员疲劳评估方法 [J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(4): 192

SUN Ruishan, CHEN Yi, SUN Libin. Controllers fatigue assessment method based on the CFF [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2022, 32(4): 192. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2022.04.028

[24] 陈俊锋, 翁建军, 吴兵, 等. 基于熵权-TOPSIS 的水上机场选址研究 [J]. 交通信息与安全, 2018, 210(2): 118

CHEN Junfeng, WENG Jianjun, WU Bing, et al. A facility location model based on entropy and TOPSIS for sea drones [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 210(2): 118