

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.01.006

乘员晕车的生理表征与缓解方法*

吴盈章¹, 林颖¹, 李文博², 余亚岚¹, 李国法¹, 郭钢¹

(1. 重庆大学机械与运载工程学院, 重庆 400044; 2. 清华大学车辆与运载学院, 北京 100084)

[摘要] 为保证智能网联汽车的乘坐舒适性与用户接受度, 建立乘员晕车缓解认知过程模型, 提出一种基于嗅觉刺激的乘员晕车缓解方法。首先充分考虑乘员满意度和晕车缓解功能性要求, 设计开展晕车缓解嗅觉刺激材料筛选实验, 选定嗅觉刺激材料的气味类型和浓度。接着为探究不同晕车程度与生理表征之间的映射关系, 验证嗅觉缓解方案的有效性, 设计开展乘员晕车缓解实车实验。结果表明: 乘员主观晕车程度与皮电激活度指标呈正相关, 与脑电不对称值呈负相关。同时, 20%浓度的姜花气味经10s释放能够有效缓解乘员晕车症状, 平均缓解效果达到22.17%, 在主客观维度上得到了一致性验证。

关键词: 晕车; 缓解方法; 嗅觉刺激; 脑电; 皮电

Physiological Manifestation and Relief Method of Passenger's Carsickness

Wu Yingzhang¹, Lin Ying¹, Li Wenbo², Yu Yalan¹, Li Guofa¹ & Guo Gang¹

1. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044;

2. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084

[Abstract] In order to enhance the comfort and user acceptance of intelligent connected vehicles, a cognitive process model for passenger carsickness mitigation is established in this paper and an olfactory stimulation-based mitigation strategy is proposed. Firstly, a screening experiment of olfactory stimulation materials for carsickness relief is designed and carried out, fully considering occupant satisfaction as well as the functional requirements of carsickness relief, to select the odor type and concentration of olfactory stimulation materials. Then, a carsickness mitigation experiment based on a real car is carried out to investigate the mapping relationship between different degrees of carsickness and physiological representations and further validate the efficiency of the olfactory mitigation method. The results show that the subjective carsickness degree is positively correlated with GSR activation and negatively correlated with EEG asymmetry. Moreover, releasing 20% ginger blossom odor for 10 seconds can effectively relieve carsickness symptoms, with an average relief effect of 22.17%, which is verified in terms of subjective and objective dimensions.

Keywords: carsickness; relief method; olfaction stimulation; electroencephalography; galvanic skin response

前言

根据2020年公安部统计数据, 全国汽车保有量为2.4291亿辆, 驾驶员达到4.18亿人^[1], 汽车已成

为必不可少的交通工具之一。然而, 不少乘车人在乘车时会产生恶心、头痛、出汗、呕吐等不适症状, 称之为晕动症(晕车)。研究发现约2/3的乘车人曾有晕动症反应, 其中约50%达到过呕吐极限^[2], 37%的长途客车乘客曾经患有晕动症^[3]。此外, 随着我国

* 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jscx-fxydX0029)和国家自然科学基金(52272421)资助。

原稿收到日期为2023年05月10日, 修改稿收到日期为2023年06月23日。

通信作者: 郭钢, 教授, 博士, E-mail: guogang@cqu.edu.cn。

汽车行业未来“新四化”发展方向的提出^[4-5],自动驾驶汽车领域迎来了蓬勃发展,驾驶员的身份随即转变为乘员。然而,研究表明汽车乘员患晕动症的概率要远大于驾驶员^[6],自动驾驶汽车的部署无疑会增加晕动症发生率,这是未来自动驾驶汽车的潜在限制因素^[7]。因此,非常有必要开展晕动症的反应机制与缓解策略相关研究,提升我国智能网联汽车乘坐舒适性与用户接受度。

针对晕动症产生机理,Reason^[8]提出晕动症视觉感知冲突理论:晕动症是一种自我造成的适应不良现象——当来自前庭系统、本体感受器和视觉的输入模式不一致时,人体内部会启动自我缓解行为。因此,前庭、本体感觉系统和视觉之间的感官冲突是导致晕动症的主要原因。同时,晕动症的另一个产生原理表明:机体为平衡由器官感知的运动和重力之间的失衡而产生的症状——一段时间内的频繁运动会刺激前庭器官,植物神经则产生应激作用调整人体反馈,从而产生呕吐、头晕等症状^[9-14]。可知,频繁的视觉感知冲突和运动平衡冲突理论上能够诱发乘员产生晕动症。

研究晕动症的有效缓解方案对智能网联汽车的发展有着重要意义。通过药物(苯巴比妥、东莨菪碱等)能够对晕动症起到有效的缓解作用^[15-16],但会产生嗜睡、口干、头痛等副作用,且限制高血压、孕妇等人群使用。同时,良好的视觉环境(增强主视野,减小周围环境的视觉影响)能够有效缓解晕动症^[17],但复杂的道路环境使视觉干预无法得到合适应用。嗅觉刺激是一个有效的主动缓解晕动症的措施。刘茜等^[18]研究表明,雾化吸入生姜精油、橘皮精油和食醋能显著降低小鼠晕动症程度。目前,专门针对汽车乘员晕动症的嗅觉缓解方法的研究较少,缓解气味类型、浓度选择合理性也易在研究过程中被忽略。

对晕动症缓解效果评价需要科学合理地评估晕动症程度。晕动症程度主要基于晕动症量表进行主观评价,如 Pensacola 晕动症问卷(motion sickness questionnaire, MSQ)^[19]、快速晕动症量表(fast motion sickness scale, FMS)^[20-21]以及痛苦程度量表(misery scale, MISC)^[22-23]。此外,客观生理指标也能用于表征晕动症水平。研究发现皮电(galvanic skin response, GSR)、心电(electrocardiogram, ECG)以及脑电(electroencephalography, EEG)等生理指标变化与晕动症密切相关。Nalivaik 等^[24]研究了晕动症的皮肤温度调节反应,并通过测量皮肤温度来推断晕动症。Nobel 等^[25]将皮电作为晕动症的测量手段,

表明出汗、体温调节等生理信号和晕动症反应之间存在内在联系。同时,研究发现当乘员产生晕动症反应时,脑电波的 δ 和 θ 频段功率增加^[26]。大脑额叶和颞叶 δ 及 β 波功率、枕区 δ 和 θ 波功率,与晕动症呈现密切的关联性^[27]。目前与晕动症相关研究中,较多基于驾驶模拟器场景,较少考虑实际道路中的复杂环境影响。在晕车程度的评定方面,主要通过乘员的主观评价来判断,针对客观生理指标与主观晕车程度的映射关系的研究较少。

因此,本文针对汽车乘员晕车缓解问题,基于人的信息加工过程和晕动症产生机理,建立乘员晕车缓解认知过程模型,并设计乘员晕车缓解方案。主要创新点如下:

(1)筛选晕车嗅觉缓解材料实现晕车缓解,兼顾乘员满意度和晕车缓解功能性要求,相较于视听触等模态的晕车缓解方法是一次新的尝试。

(2)晕车诱导方式采用真实车辆在复杂道路上行驶,涵盖视觉感知冲突与运动平衡冲突,实验环境更加合理,所得主客观数据更贴合实际晕车发生工况。同时,本研究采用的脑电各频段不对称值能更好表征不同晕车状态下乘员感知与愉悦度差异。

(3)基于客观生理指标与主观晕车程度相映射方法,建立乘员晕车程度主客观评定模型,对乘员晕车嗅觉缓解效果进行一致性验证,为汽车乘员晕车主动缓解策略提供新思路。

1 乘员晕车缓解方案

本文基于人的信息加工过程,从晕车的产生原理、影响因素以及表征3个方面建立了乘员晕车缓解认知过程模型,如图1所示。

人的晕车认知过程分为信息输入、认知处理和信息输出3阶段。信息输入表示乘员对座舱环境、驾驶行为、道路状况等因素的感知过程;认知处理过程为大脑对感知到的运动/环境信息进行认知处理,从而产生视觉感知冲突与运动平衡冲突;信息输出为身体对处理后信息所产生的反应,晕车的反应表现为出汗、头晕、恶心等,本文采用主观量表、皮电和脑电作为晕车的量化表征。在晕车缓解过程中,乘员对缓解刺激感知,再次经历认知过程,进行认知重评。

基于乘员晕车缓解认知过程模型,本研究设计了乘员晕车缓解方案(图2),分为晕车缓解嗅觉刺激材料筛选实验、乘员晕车缓解实车实验和乘员晕车嗅觉缓解效果分析3部分。

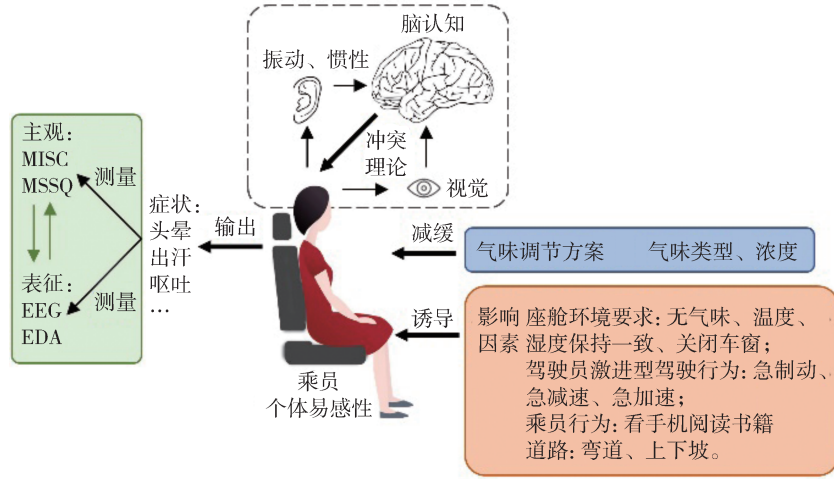


图1 晕车缓解认知过程模型

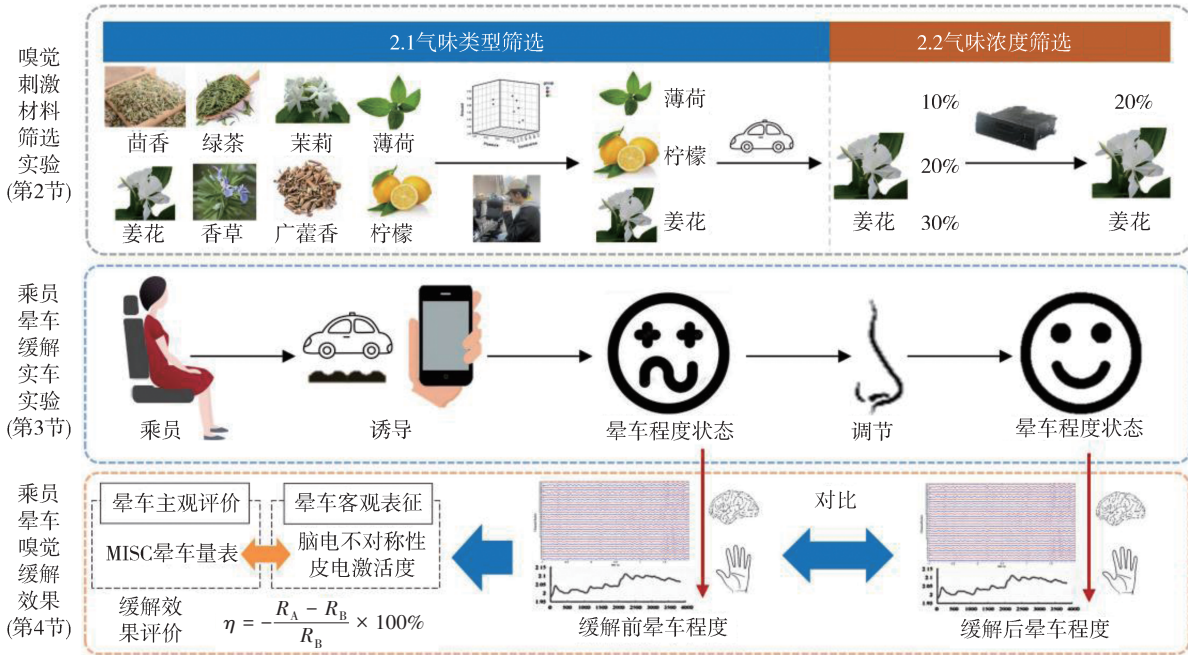


图2 乘员晕车缓解实验方案

晕车缓解嗅觉刺激材料筛选实验筛选晕车缓解气味材料,通过控制气味类型和浓度两个因素选取正向激励(令人愉悦)气味。

乘员晕车缓解实车实验进行乘员晕车诱导与晕车状态调节,采集乘员晕车主客观数据。经过乘员晕车认知过程,在感知到晕车诱导因素后,乘员产生晕车表现。之后进行乘员嗅觉刺激,达到晕车缓解目的。在此过程中,须保证晕车发生条件可控:关闭车窗,减少空气流通;乘员在行驶过程中阅读,增强视觉感受;选择弯曲/颠簸路面。

最后验证乘员晕车嗅觉缓解效果。首先建立乘员晕车主观评价与脑电、皮电的映射关系。然后对比晕车缓解前后的脑电、皮电指标变化,进行晕车缓解效果的一致性验证。

2 实验一:晕车缓解嗅觉刺激材料筛选

2.1 气味类型筛选

2.1.1 气味类型初选实验

30名被试对8种气味类型(香草、茉莉、姜花、柠

檬、薄荷、茴香、广藿香、绿茶)进行满意度评价。自我报告人体模型量表(self-assessment manikin, SAM)^[28]被用于评定气味的满意程度,包括愉悦度、

唤醒度和支配度3个维度。9点Likert量表(1=“根本不”,9=“极其”)被用于划分愉悦度、唤醒度和支配度等级,如表1所示。

表1 9点SAM量表

维度	9点Likert量表								
愉悦度 (Pleasure)									
唤醒度 (Arousal)									
支配度 (Dominance)									

对于每种气味的SAM量表数据,计算各气味在愉悦度、唤醒度和支配度3个维度上30名被试的平均评分。利用K-means将气味类型分为愉悦不刺激、愉悦且刺激和不愉悦3类。如图3所示,Group1表示气味令人愉悦但刺激性较弱,Group2表示气味既令人愉悦又有一定刺激性,Group3表示气味不能令人感到愉悦。由此选择Group2为待定气味,即柠檬、薄荷和姜花。

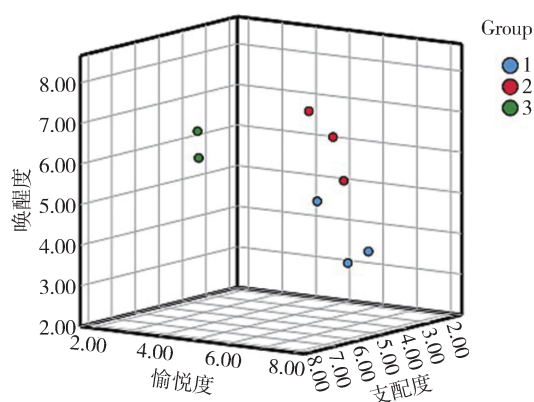


图3 K-means 聚类结果图

2.1.2 气味类型选定实车实验

为进一步选定气味类型,须对上述初选气味(柠檬、薄荷和姜花)晕车缓解功能性进行实车验证。共5名被试分别进行3次实验,为防止产生训练效应,每次实验间隔1周。气味源为配置相同浓度的初选气味的精油,由气味控制装置触发。

考虑被试的易理解性和晕车评定实时记录需求,本文选用MISC量表^[22](表2)记录被试实验过程

中的晕车程度,从轻到重划分为11级(0-10)。

表2 MISC量表(11级)

症状	程度	MISC
没有任何不舒服		0
有些不舒服,但无特别症状		1
	模糊	2
眩晕,变冷/热,头疼,胃/喉咙难受,出汗,视线模糊,打哈欠,打嗝,疲惫,分泌唾液增多,但不恶心	轻微	3
	较明显	4
	严重	5
	轻微	6
恶心	较明显	7
	严重	8
	干呕	9
呕吐		10

采用缓解效果指标 η 作为评价标准,即

$$\eta = -\frac{(R_A - R_B)}{R_B} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R_A 为缓解后MISC程度; R_B 为缓解前MISC程度。

实车实验流程如图4所示。驾驶员驾驶车辆行驶在规定道路,被试位于后排座,通过路面激励与手机阅读的视觉诱导进行晕车诱导。被试每隔5 min汇报MISC量表。当MISC主观评价达到6级及以上时,气味控制装置释放相同浓度候选气味。气味开始释放20 s之后再次进行MISC主观评价(气味释放持续时间10 s,等待气体扩散时间10 s。该时间通过预实验记录被试首次感知到气味类型的平均反应时间确定,保证被试在此时间段内能够充分感知气味)。在此期间,要求被试首次感知到气味时立刻汇

报气味类型。从开始释放气味至被试汇报气味类型的时间间隔被记录为反应时间。实验结束后打开车窗散去残留气味,并对被试进行深度访谈,探究候选气味对晕车程度症状的缓解效果。



图4 气味类型选定实车实验流程图

晕车缓解效果与深度访谈结果表明:薄荷气味缓解效果均值为12.86%,可让人清醒,对眩晕有一定缓解作用,但不能抑制恶心、呕吐等;柠檬气味缓解效果均值为9.05%,可让人心情愉悦,缓解心理上的感受,而对生理反应缓解没有太大作用;姜花气味缓解效果均值为15.24%,可较有效地抑制恶心、呕吐等,也可让人清醒,但清醒效果(眩晕缓解)不如薄荷气味。故最终确定姜花气味为晕车缓解嗅觉刺激材料。

2.2 气味浓度筛选

确定姜花气味作为晕车缓解刺激材料之后,本研究比较乘员对10%、20%和30%3种气味浓度的反应时间和满意度。在被试阅读手机过程中,释放3种不同浓度气味,每次间隔10 min(消散气味)。评价结果如表3所示。从反应时间上可见30%浓度最具有刺激性,10%浓度过淡容易忽视;10%和20%浓度的满意度得分是最好的。故选定20%浓度姜花气味作为晕车缓解刺激材料,既能让被试快速注意到气味(刺激性)又不会过于刺鼻而导致被试反感(满意度)。

表3 不同浓度下的反应时间和满意度评价结果

浓度	10%	20%	30%
反应时间/s	14.8	6.6	5.0
满意度	7.2	7.2	6.4

3 实验二:乘员晕车缓解实车实验

本研究进行乘员晕车缓解实车实验,采集乘员各晕车程度和嗅觉缓解前后主客观数据。客观指标包括皮电生理指标和脑电不对称值,探究生理表征与晕车程度的映射关系。分析嗅觉刺激缓解方案对乘员晕车缓解效果的有效性,并进行晕车主客观表

征的一致性验证。

3.1 晕车诱导方式

本文基于晕动症产生机理,采取多重诱导方式加速乘员晕车过程:

一是运动诱导。要求车辆经历多频次的横/纵向速度变化以及垂直运动,通过道路场景选择和驾驶员驾驶行为诱使乘员晕车发生。

二是视觉诱导。要求被试在车辆行驶过程中阅读手机文字加重视觉与本体感知的冲突,加快乘员晕车产生。手机画面亮度须合适,文字内容较为中性,不引起被试情绪波动。

3.2 被试筛选

本研究采用晕动症易感性量表(motion sickness susceptibility questionnaire, MSSQ)^[29],调研被试以往处于各类场景(小汽车、公共汽车或长途汽车、火车、飞机、小船、轮船、秋千、旋转木马、过山车或游乐场电动乘骑类运动)时发生晕动症(因机体暴露于运动环境中,受不适宜的运动环境的刺激而引起头晕、上腹部不适、恶心、呕吐、出冷汗、面色苍白等前庭和自主神经反应为主的症候群)反应的频率(0从未,1很少,2有时,3经常,4总是)。

30名被试(男:女=3:2)通过MSSQ量表筛选参与实验。所有被试均满足:①MSSQ问卷总分 ≥ 6 ;②身体状况健康(无感冒、无前庭功能障碍、视力正常/矫正至正常);③实验前24 h内正常作息,未饮用酒精类饮品或进行剧烈运动,保证在实验过程中处于良好的精神状态;④对气味无不良反应。所有被试签署知情同意书,并被告知如有不适可随时退出实验。

3.3 实验场景与设备

3.3.1 真实道路场景

实验路线与真实道路场景包含诱导晕车所需的曲折/颠簸路面和数据采集所需直线平整路面(图5)。道路场景形成一个闭环,行驶总长3.7 km,行驶时长6.5~7 min。

实验选择晴天/多云天气进行,外界温度约为15℃。为满足晕车运动诱导要求,驾驶员为专业驾驶员(驾龄 >10 年),熟悉实验路段,在直线行驶过程中保持稳定60 km/h车速行驶,在曲折/颠簸路段频繁加/减速。

在正式实验中,车辆实际行驶状态如表4所示。平均速度32.7 km/h,速度标准差18.21 km/h,满足实验要求。

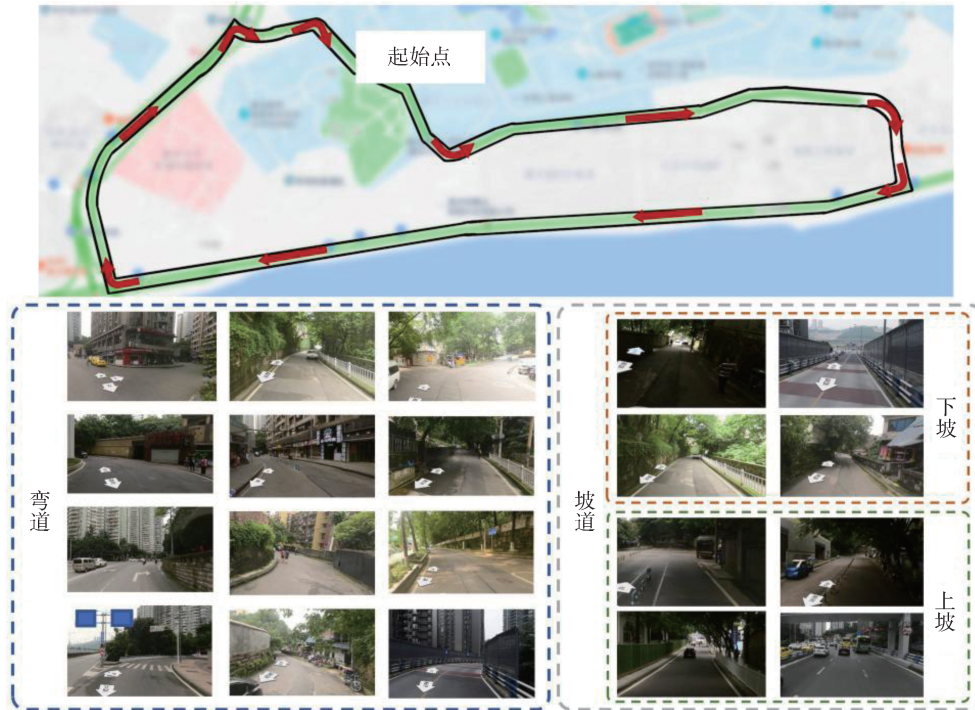


图5 实验路线与真实道路场景

表4 车辆行驶数据

场景	平均速度/(km·h ⁻¹)	速度标准差/ (km·h ⁻¹)
直线道路(采集数据)	59.39	3.48
曲折/颠簸道路(诱导晕车)	25.03	9.59
整体	32.70	18.21

3.3.2 车内设备连接场景

车内设备连接场景如图6所示。实验采用手动换挡小轿车作为测试车辆,车内无异味,车窗完好无损。所需设备为脑电仪、多通道生理仪、GPS模块、气味控制装置和手机。

客观数据采集设备信息如下。

(1)脑电仪:采用Neuroelectrics公司Eno-Bio 32通道可穿戴无线干电极脑电系统,通道位置符合国际通用脑电10-10系统,采样频率500 Hz。

(2)多通道生理仪:采用Great Lakes NeuroTechnologies公司4通道无线BioRadio多通道生理仪,用于采集被试的皮电信号数据,采样频率250 Hz。

(3)GPS模块:采用G-Mouse卫星信号接收模块,能够采集位置和速度信息。用于采集车辆行驶状态数据,采样频率5 Hz。

3.4 乘员晕车程度评价指标体系

脑电能够表征感知、认知行为和情感过程等活动^[30-34],根据不同频率分为 δ (1-4 Hz)、 θ (4-8 Hz)、 α (8-13 Hz)、 β (13-30 Hz)和 λ (30-100 Hz)5个波段。皮肤电反应(皮电)为汗腺活动或交感神经系统变化导致的皮肤电阻波动,本研究选用汗腺密度较高的手掌作为皮电测量部位。

本研究通过乘员晕车主观评价程度与客观生理指标(脑电指标和皮电指标)相互映射来评定晕车程度,表示如下:

$$R(t) = F(\mathbf{B}(t), \mathbf{S}(t)) \quad (2)$$

式中: R 为晕车程度; $\mathbf{B}(t)$ 为脑电状态数据; $\mathbf{S}(t)$ 为皮电数据; t 为时间。

(1)晕车主观量表

晕车程度 R 通过MISC主观量表进行评价。

(2)脑电指标

将脑电信号通过去除坏道、工频滤波、重参考、主成分分析(ICA)进行预处理,并通过以下方式提取脑电指标。脑电状态数据 $\mathbf{B}(t)$ 为 $m \times n$ 矩阵, b_{ij} 表示某时刻各通道各频段脑电波, $\mathbf{B}(t)$ 包含32通道 \times 5波段=160列的数据, m 为采样数, n 为160,表现方式如下:



图6 场景搭建与设备连接图

$$B(t) = (b_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

本研究选取脑电通道涉及额叶、顶叶、颞叶等脑区,并将脑电各波段的不对称值作为指标,定义如下^[35]:

$$L = \ln(P_{\text{right}}) - \ln(P_{\text{left}}) \quad (4)$$

式中: P_{left} 为左脑对应电极通道的功率平均值; P_{right} 为右脑对应电极通道的功率平均值。

大脑感知活动与不对称值成反比关系,计算结果较高的分数表示相对较大的左脑活动,而较低的分数表示相对较大的右脑活动^[36]。

(3) 皮电指标

利用小波阈值去噪方法获得去除噪声的皮电信号,然后通过以下方式提取皮电指标。皮电状态数据 $S(t)$ 为 $m \times 1$ 矩阵,其中 m 为采样数, s_{ij} 表示为某时刻皮电幅值,表现方式如下:

$$S(t) = (s_{ij})_{m \times 1} = \begin{bmatrix} s_1 \\ \vdots \\ s_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

本研究选取某段时间内皮电激活度作为乘员晕车评价指标,定义如下:

$$S_i = \frac{V_i}{V_{\text{静}}} \quad (6)$$

式中: V_i 为某时刻皮电幅值; $V_{\text{静}}$ 为该被试静态时的皮电幅值均值。同时,皮电激活度最大(小)值 S_{max} (S_{min})、均值 \bar{S} 、标准差 σ_s 和中位数 S_M 也作为指标进一步分析。

3.5 实验流程与数据采集

乘员晕车缓解实验每次约40 min,分为静态和动态两部分。

静态部分要求被试佩戴好仪器设备后,于汽车副驾驶后排入座,并调整至舒适坐姿,阅读手机材料,保持静止并使身体情绪状态平静,采集1 min生理数据(皮电和脑电)作为基准值。

动态部分要求被试乘坐于汽车副驾驶后排座位,阅读手机材料。车辆每次进入直线道路前,被试完成MISC主观问卷,报告当前晕车程度,实验过程如图7所示。该部分记录乘员3种状态。

正常状态:由于被试在第一圈到达直线道路时均未有明显晕车反应,故选取该直线路段生理数据(1 min)标记为正常状态。

晕车状态:当被试的晕车MISC程度 ≥ 6 级后,在进入下一段直线道路时,被试再次完成MISC主观量表,然后采集该直线路段的生理数据(1 min)标记为晕车状态。

晕车缓解状态:当车辆行驶至直线路段1/3处时释放刺激气味持续10 s,再经10 s气味扩散,询问

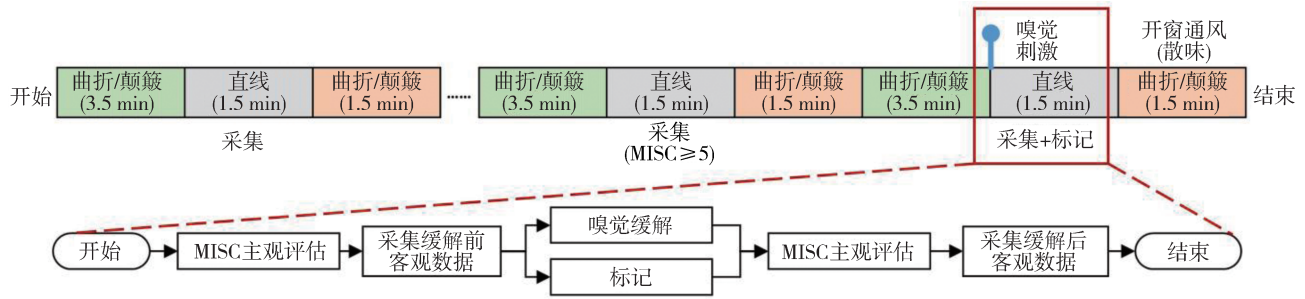


图7 动态实验流程(图中的时间为该段道路预估时间)

MISC晕车程度,同时采集缓解后的生理数据(1 min)标记为晕车缓解状态。

3.6 晕车程度与嗅觉缓解效果数据分析方法

为分析晕车程度变化与乘员生理状态映射关系,印证嗅觉刺激对晕车程度缓解主客观一致性效果,本研究基于Kruskal-Wallis非参数检验分析各晕车程度的生理指标差异。根据正式实验被试MISC量表报告的最大晕车程度将晕车等级分为7级。

本文通过统计检验力来确定每个晕车等级分组所需要样本量,并设定效应量为0.4,统计检验力为0.90。基于G-power^[37]可得,实验所需总样本量为140(平均每组需样本量为20)。本研究根据晕车程度主观评价,将预处理后的生理数据进行分段,并提取特征,得到总样本量为463。其中晕车程度1级样本量为156,2级样本量为28,3级样本量为59,4级样本量为85,5级样本量为38,6级样本量为76,7级样本量为21。

为进一步比较晕车程度间差异,本文选取 η^2_{ii} 作为效应量指标,计算公式为

$$\eta^2_{ii} = \frac{H - k + 1}{n - k} \quad (7)$$

式中: H 为Kruskal-Wallis检验量; k 为组数; n 为样本总数。

4 嗅觉刺激对晕车缓解效果分析

4.1 晕车诱导结果分析

为验证乘员晕车诱导方案有效性,本文对晕车诱导结果进行统计性分析,如图8所示。结果表明30名被试前3圈的晕车程度变化:MISC前3圈评分均值分别为1.24、3.73、5.53。可知随着圈数的增加,晕车程度呈现明显上升趋势,说明晕车诱导成功。

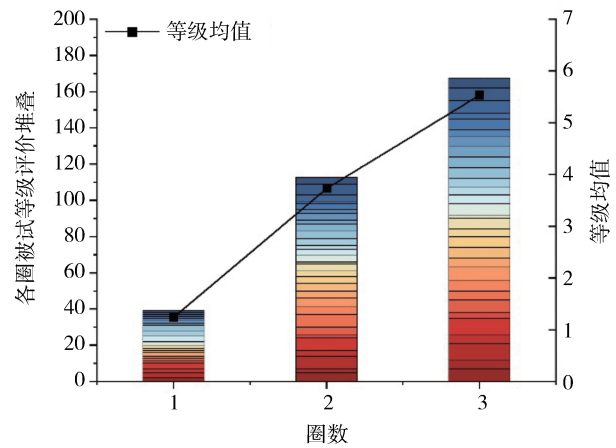
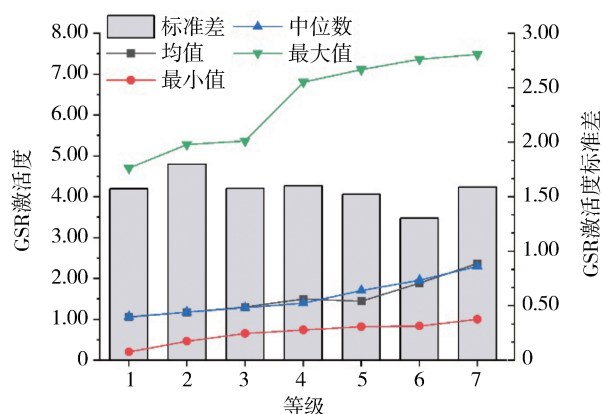


图8 前3圈MISC等级评价结果

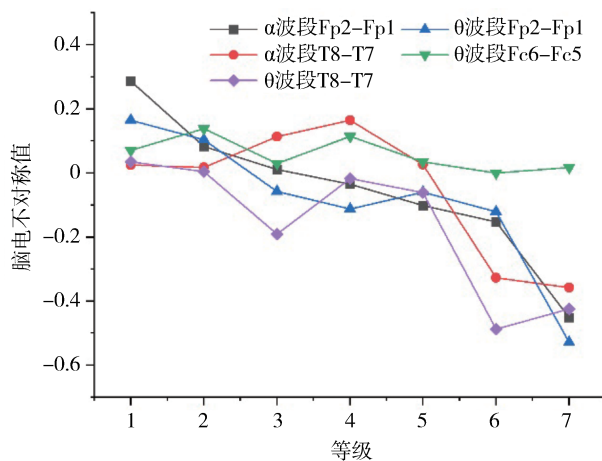
4.2 乘员不同晕车程度与生理指标的映射关系

不同晕车程度的皮电激活度相关指标均存在显著差异,其中 S_{\max} ($H=53.049, p<0.05, \eta^2_{ii}=0.1032$)、 S_{\min} ($H=39.492, p<0.05, \eta^2_{ii}=0.0734$)、 \bar{S} ($H=22.821, p<0.05, \eta^2_{ii}=0.0369$)、 σ_s ($H=19.236, p<0.05, \eta^2_{ii}=0.0290$)、 S_M ($H=38.435, p<0.05, \eta^2_{ii}=0.0711$)。如图9(a)所示,晕车程度与 S_{\max} 、 S_{\min} 、 \bar{S} 、 S_M 之间均呈正相关,其中 S_{\max} 的效应量最大,可知晕车程度对 S_{\max} 影响最大。随着晕车程度加深,乘员皮电激活度上升。Irmak等^[38]提取了相位GSR表征晕动症,表明相位GSR与晕动症程度呈显著正相关,与本研究结论一致。同时,研究表明晕车激活了交感神经系统,且这种激活能够通过GSR得到明显反应^[39]。可以推断,GSR能够表征晕车带来的生理反应,本研究提取的皮电激活度指标能够有效表征乘员晕车程度变化趋势。

不同晕车程度的脑电不对称值中 α 波段Fp2-Fp1 ($H=54.610, p<0.05, \eta^2_{ii}=0.1066$)、 α 波段T8-T7 ($H=12.620, p<0.05, \eta^2_{ii}=0.0145$)、 θ 波段Fp2-Fp1 ($H=32.537, p<0.05, \eta^2_{ii}=0.0582$)、 θ 波段Fc6-Fc5



(a) 不同晕车程度下的皮电指标



(b) 不同晕车程度脑电不对称值变化

图9 各晕车程度皮电脑电数据变化结果

($H=13.565, p<0.05, \eta^2=0.0166$)和 θ 波段T8-T7 ($H=13.464, p<0.05, \eta^2=0.0164$)存在显著差异。由图9(b)可知,晕车程度与上述脑电不对称性指标均呈负相关,其中 α 波段Fp2-Fp1的脑电不对称值效应量最大,表明晕车程度对其影响最大。当晕车程度较为严重时(即MISC评分为6-7级),脑电不对称值为负,表明右脑呈现更活跃状态。值得注意的是,研究表明前额叶 α 波段脑电不对称性与负向情绪有关^[40],当被试表现出负向情绪时,右脑激活更明显。本研究中,Fp2-Fp1处于前额区域, α 波段脑电不对称值随着晕车程度上升而下降,表明晕车程度加深对人情绪的影响呈现负向激励。Lohani等^[41]发现额叶区脑电 θ 波段活动与大脑参与认知过程有关,且 θ 波段活动的增加主要发生在右额叶电极(即额叶 θ 波段脑电不对称性),而颞叶的 θ 波段脑电不对称性同样能够表征与视觉/运动相关精神负

荷^[42]。本研究中,Fp2-Fp1处于前额区域,FC6-FC5处于额叶区域,T8-T7处于颞叶区域, θ 波段脑电不对称值随着晕车程度上升而下降,表明右脑呈现更活跃状态。可以认为,晕车程度加深刺激了被试的认知过程反应,增加了精神负荷。可知,本研究提取的脑电不对称值指标特征能够有效地表征乘员晕车程度的变化趋势。

4.3 嗅觉刺激缓解效果主客观一致性验证

前面论证了乘员不同晕车程度与生理指标的映射关系,发现随着乘员晕车程度加深,皮电激活度上升,脑电不对称值下降。进一步对乘员晕车嗅觉刺激缓解效果讨论须进行主客观指标一致性验证。

本研究通过独立样本T检验分析性别对晕车缓解效果的影响。结果表明,晕车缓解效果在性别维度上(男/女)没有表现出显著差异($t=-1.255, p=0.220>0.05$)。该结果与Park等^[43]的研究结论一致。

本研究对乘员正常、晕车、晕车缓解3种状态进行晕车程度差异性分析,包括主观晕车程度和客观生理表征。结果表明,3种晕车状态之间的主客观表征维度均存在显著差异($p<0.05$)。主观晕车维度上,晕车程度MISC量表评价均值在缓解前的晕车状态下为6.467。经嗅觉缓解后,乘员晕车程度均值下降至5.033,平均缓解效果为 $\bar{\eta}=22.17\%$ 。客观生理表征如图10所示,经嗅觉缓解后皮电激活度有明显下降,脑电各波段功率不对称值略有上升,表现出左脑活跃性升高,嗅觉刺激属于正向激励,乘员的晕车程度有所缓解。Keshavarz等^[44]研究了令人愉快的气味与令人不愉快的气味对由视觉引起的晕动症的影响,结果表明,令人愉快的气味能够有效缓解晕动症。此外,Paillard等^[45]研究表明,由运动引起的晕动症能够增加被试嗅觉敏感度,使令人愉快的气味被认为更愉快,令人不愉快的气味被认为更不愉快。同时,Lien等^[46]研究了生姜气味对晕动症的影响。结果表明,生姜气味能有效减轻晕动症所带来的恶心感受。本研究中,晕车状态的诱导综合了视觉诱导因素和运动诱导因素。基于实验一结果选定的20%浓度姜花气味被认为是令人愉快的气味,在晕车状态下即更容易被乘客感知又能够有效缓解晕动症,这与前述研究的结论一致^[44-46]。

以上分析可知,20%浓度的姜花气味经10s释放能够有效缓解乘员晕车症状,并在主客观维度上得到一致性验证。

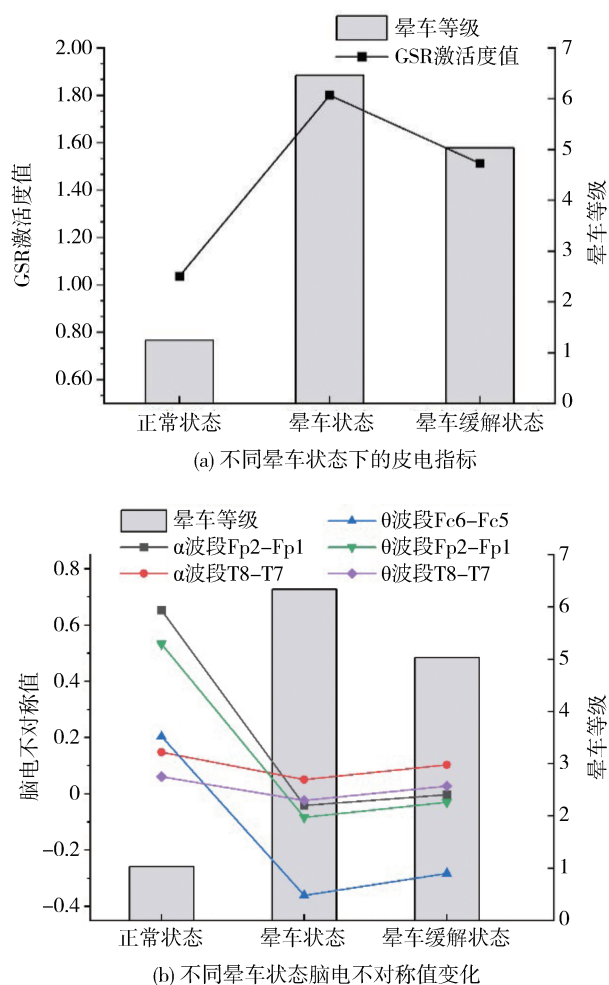


图10 不同晕车状态主客观数据变化

5 结论

(1)针对汽车乘员晕车缓解问题,基于人的信息加工过程和晕动症产生机理,分析乘员晕车的影响因素与生理表征,建立了乘员晕车缓解认知过程模型,设计了乘员晕车缓解方案。

(2)开展晕车缓解嗅觉刺激材料筛选实验,结果表明:20%浓度的姜花气味能够同时满足乘员晕车缓解的满意度和功能性要求,可作为乘员晕车缓解的嗅觉刺激材料。

(3)开展乘员晕车缓解实车实验,建立不同晕车程度与生理表征之间的映射关系。结果表明:乘员主观晕车程度与皮电激活度指标呈正相关,与脑电不对称值呈负相关。同时,20%浓度的姜花气味经10 s释放能够有效缓解乘员晕车症状,平均缓解效果达到22.17%,在主客观维度上得到一致性验证。

(4)针对不同属性人群(年龄/性别等)的嗅觉晕车缓解效果差异与缓解方案以及缓解效果持续时间有待进一步研究。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2021, 471(3): 8-22.
National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of the People's Republic of China on national economic and social development in 2020 [J]. China Statistics, 2021, 471(3): 8-22.
- [2] SCHMIDT E A, KUIPER O X, WOLTER S, et al. An international survey on the incidence and modulating factors of carsickness[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2020, 71: 76-87.
- [3] TURNER M, GRIFFIN M J. Motion sickness in public road transport: the effect of driver, route and vehicle [J]. Ergonomics, 1999, 42(12): 1646-1664.
- [4] 张晓聪. 汽车智能座舱发展现状及未来趋势[J]. 汽车纵横, 2019(8): 42-45.
ZHANG X C. Development status and future trends of automotive smart cockpit [J]. Auto Review, 2019(8): 42-45.
- [5] 李克强, 戴一凡, 李升波, 等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1-14.
LI K Q, DAI Y F, LI S B, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2017, 8(1): 1-14.
- [6] ROLNICK A, LUBOW R E. Why is the driver rarely motion sick? the role of controllability in motion sickness [J]. Ergonomics, 1991, 34(7): 867-879.
- [7] 高振海, 金励辛, 高菲, 等. 自动驾驶车辆晕动症研究综述[J]. 汽车技术, 2022(8): 1-9.
GAO Z H, JIN L X, GAO F, et al. A research review on motion sickness in autonomous vehicles [J]. Automobile Technology, 2022(8): 1-9.
- [8] REASON J T. Motion sickness adaptation: a neural mismatch model [J]. Journal of the Royal Society of Medicine, 1978, 71(11): 819-829.
- [9] JAMES W. The sense of dizziness in deaf-mutes [J]. American Annals of the Deaf and Dumb, 1883, 28(2): 102-117.
- [10] ORIEL G H. The pathology of sea-sickness [J]. Lancet, 1927: 811-813.
- [11] CHEUNG B S K, HOWARD I P, NEDZELSKI J M, et al. Circularvection about earth-horizontal axes in bilateral labyrinthine-defective subjects [J]. Acta Oto-Laryngologica, 1989, 108(5-6): 336-344.
- [12] CHEUNG B S, HOWARD I P, MONEY K E. Visually-induced sickness in normal and bilaterally labyrinthine-defective subjects [J]. Aviation, Space, and Environmental Medicine, 1991, 62(6): 527-531.
- [13] JOHNSON W H, SUNAHARA F A, LANDOLT J P. Importance of the vestibular system in visually induced nausea and self-vec-

- tion[J]. *Journal of Vestibular Research*, 1999, 9(2): 83–87.
- [14] GRAYBIEL A. Susceptibility to acute motion sickness in blind persons[M]. US Naval Aerospace Medical Institute, Naval Aerospace Medical Center, 1970.
- [15] SHUPAK A, GORDON C R. Motion sickness: advances in pathogenesis, prediction, prevention, and treatment [J]. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 2006, 77 (12): 1213–1223.
- [16] SHERMAN C R. Motion sickness: review of causes and preventive strategies [J]. *Journal of Travel Medicine*, 2002, 9 (5): 251–256.
- [17] KESHAVARZ B, HECHT H, ZSCHUTSCHKE L. Intra-visual conflict in visually induced motion sickness[J]. *Displays*, 2011, 32(4): 181–188.
- [18] 刘茜, 兰彪盛, 焦亚军, 等. 雾化吸入不同植物精油对小鼠的抗晕动病作用[J]. *实用预防医学*, 2019, 26(1): 109–110, 113.
LIU Q, LAN B S, JIAO Y J, et al. Curative effect of atomized inhalation of different plant essential oils on mice with motion sickness [J]. *Practical Preventive Medicine*, 2019, 26 (1): 109–110, 113.
- [19] KENNEDY R S, TOLHURST G C, GRAYBIEL A. The effects of visual deprivation on adaptation to a rotating environment[R]. Naval School of Aviation Medicine Pensacola Fla, 1965.
- [20] BOS J E, DE VRIES S C, VAN EMMERIK M L, et al. The effect of internal and external fields of view on visually induced motion sickness[J]. *Applied Ergonomics*, 2010, 41(4): 516–521.
- [21] KESHAVARZ B, HECHT H. Validating an efficient method to quantify motion sickness [J]. *Human Factors*, 2011, 53 (4): 415–426.
- [22] BOS J E, MACKINNON S N, PATTERSON A. Motion sickness symptoms in a ship motion simulator: effects of inside, outside, and no view[J]. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 2005, 76(12): 1111–1118.
- [23] WERTHEIM A H, BOS J E, KRUL A J. Predicting motion induced vomiting from subjective misery (MISC) ratings obtained in 12 experimental studies[M]. TNO Human Factors, 2001.
- [24] NALIVAICO E, RUDD J A, SO R H Y. Motion sickness, nausea and thermoregulation: the “toxic” hypothesis [J]. *Temperature*, 2014, 1(3): 164–171.
- [25] NOBEL G, TRIBUKAIT A, MEKJAVIC I B, et al. Effects of motion sickness on thermoregulatory responses in a thermoneutral air environment[J]. *European Journal of Applied Physiology*, 2012, 112(5): 1717–1723.
- [26] CHELEN W E, KABRISKY M, ROGERS S K. Spectral analysis of the electroencephalographic response to motion sickness [J]. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 1993, 64 (1): 24–29.
- [27] CHUANG S W, CHUANG C H, YU Y H, et al. EEG alpha and gamma modulators mediate motion sickness-related spectral responses [J]. *International Journal of Neural Systems*, 2016, 26 (2): 1650007.
- [28] BRADLEY M M, LANG P J. Measuring emotion: the self-assessment manikin and the semantic differential [J]. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry*, 1994, 25(1): 49–59.
- [29] GOLDING J F. Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire [J]. *Personality and Individual Differences*, 2006, 41(2): 237–248.
- [30] LIU Y, SOURINA O. Real-time subject-dependent EEG-based emotion recognition algorithm [M]. *Transactions on Computational Science XXIII*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014: 199–223.
- [31] LIU Y, SOURINA O. EEG databases for emotion recognition [C]. 2013 International Conference on Cyberworlds, 2013: 302–309.
- [32] DADEBAYEV D, GOH W W, TAN E X. EEG-based emotion recognition: review of commercial EEG devices and machine learning techniques [J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2021.
- [33] LAN Z, SOURINA O, WANG L, et al. Stability of features in real-time EEG-based emotion recognition algorithm [C]. 2014 International Conference on Cyberworlds, 2014: 137–144.
- [34] TORRES E P, TORRES E A, HERNÁNDEZ-ÁLVAREZ M, et al. EEG-based BCI emotion recognition: a survey [J]. *Sensors*, 2020, 20(18): 5083.
- [35] COAN J A, ALLEN J J B. Frontal EEG asymmetry as a moderator and mediator of emotion [J]. *Biological Psychology*, 2004, 67(1–2): 7–50.
- [36] OAKES T R, PIZZAGALLI D A, HENDRICK A M, et al. Functional coupling of simultaneous electrical and metabolic activity in the human brain [J]. *Human Brain Mapping*, 2004, 21 (4): 257–270.
- [37] FAUL F, ERDFELDER E, LANG A G, et al. G* power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences [J]. *Behavior Research Methods*, 2007, 39(2): 175–191.
- [38] IRMAK T, POOL D M, HAPPEE R. Objective and subjective responses to motion sickness: the group and the individual [J]. *Experimental Brain Research*, 2021, 239: 515–531.
- [39] BENEDEK M, KAERNBACH C. A continuous measure of phasic electrodermal activity [J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2010, 190(1): 80–91.
- [40] HARMON-JONES E, ALLEN J J. Anger and frontal brain activity: EEG asymmetry consistent with approach motivation despite negative affective valence [J]. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1998, 74(5): 1310.
- [41] LOHANI M, PAYNE B R, STRAYER D L. A review of psychophysiological measures to assess cognitive states in real-world driving [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2019, 13: 57.
- [42] DIAZ-PIEDRA C, SEBASTIÁN M V, DI STASI L L. EEG theta power activity reflects workload among army combat drivers: an experimental study [J]. *Brain Sciences*, 2020, 10(4): 199.
- [43] PARK A H, HU S. Gender differences in motion sickness history and susceptibility to optokinetic rotation-induced motion sickness [J]. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 1999, 70 (11): 1077–1080.

- 3488–3496.
- [82] SHI H, GUO L, TAN S, et al. Rolling bearing initial fault detection using long short-term memory recurrent network [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 171559–171569.
- [83] OH H, JUNG J H, JEON B C, et al. Scalable and unsupervised feature engineering using vibration–imaging and deep learning for rotor system diagnosis [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(4): 3539–3549.
- [84] HADRAOUI H E, LAAYATI O, GUENNOUNI N, et al. A data-driven model for fault diagnosis of induction motor for electric powertrain [C]. 2022 IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON). Palermo, Italy: IEEE, 2022: 336–341.
- [85] 张丹, 赵吉文, 董菲, 等. 基于概率神经网络算法的永磁同步直线电机局部退磁故障诊断研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(1): 296–306, 344.
ZHANG D, ZHAO J W, DONG F, et al. Partial demagnetization fault diagnosis research of permanent magnet synchronous motors based on the PNN algorithm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(1): 296–306, 344.
- [86] LI Z, WU Q, YANG S, et al. Diagnosis of rotor demagnetization and eccentricity faults for IPMSM based on deep CNN and image recognition [J]. *Complex & Intelligent Systems*, 2022, 8(6): 5469–5488.
- [87] HUANG F, ZHANG X, QIN G, et al. Demagnetization fault diagnosis of permanent magnet synchronous motors using magnetic leakage signals [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2022, 19(4): 6105–6116.
- [88] 赵靖, 杨绍普, 李强, 等. 一种残差注意力迁移学习方法及其在滚动轴承故障诊断中的应用 [J]. *中国机械工程*, 2023, 34(3): 332–343.
ZHAO J, YANG S P, LI Q, et al. A new transfer learning method with residual attention and its application on rolling bearing fault diagnosis [J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(3): 332–343.
- [89] 贾晗, 尚前明, 金华标. 多源信息融合的电机小样本故障诊断 [J/OL]. *机械科学与技术*: 1–9 [2023–05–21]. <http://libvnp.cqjtu.edu.cn:80/rwt/CNKI/https/MSYXTLUQPJUB/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230234>.
- JIA H, SHANG Q M, JIN H B. Multi-source information fusion for motor small-sample fault diagnosis [J/OL]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*: 1–9 [2023–05–21]. <http://libvnp.cqjtu.edu.cn:80/rwt/CNKI/https/MSYXTLUQPJUB/10.13433/j.cnki.1003-8728.20230234>.
- [90] 张希, 廖宇兰, 李沁逸, 等. 安全行驶下的车用电机轴承的数字孪生故障诊断 [J]. *汽车安全与节能学报*, 2023, 14(2): 232–238.
ZHANG X, LIAO Y L, LI Q Y, et al. Fault diagnosis of vehicle motor–bearings under safe running by digital–twin technology [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2023, 14(2): 232–238.

(上接第60页)

- [44] KESHAVARZ B, STELZMANN D, PAILLARD A, et al. Visually induced motion sickness can be alleviated by pleasant odors [J]. *Experimental Brain Research*, 2015, 233: 1353–1364.
- [45] PAILLARD A C, LAMÔRÉ M, ETARD O, et al. Is there a relationship between odors and motion sickness? [J]. *Neuroscience Letters*, 2014, 566: 326–330.
- [46] LIEN H C, SUN W M, CHEN Y H, et al. Effects of ginger on motion sickness and gastric slow-wave dysrhythmias induced by circular vection [J]. *American Journal of Physiology–Gastrointestinal and Liver Physiology*, 2003, 284(3): G481–G489.