

亮度对比及颜色组合对车载界面认知的影响

吴正新, 金涛, 顾浩然, 明成业

(中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: **目的** 对车载信息系统界面中亮度对比及颜色组合的认知机理进行分析。**方法** 采用知觉负载范式, 实验 A 采用 6 : 1、9 : 1、12 : 1 和 18 : 1 共 4 种亮度对比水平下的 16 种颜色组合作为实验材料, 对高、中、低载荷下的错误率进行分析。实验 B 在实验 A 基础上进行脑电研究。**结果** 实验 A: 在高、中载荷下, 18 : 1 的亮度对比显著降低了目标搜索出错率, 黄色/黑色、黄色/蓝色和白色/蓝色是搜索错误率最低的 3 种颜色组合; 在低载荷下无显著影响。实验 B: 脑区地形图表明, 在 18 : 1 的亮度对比及颜色组合视觉刺激下, 枕叶、前额叶及颞叶脑区激活程度更强; 相对于低载荷, 高、中载荷的脑区激活程度更弱。ERP 的结果分析表明, 在 18 : 1 的亮度对比及颜色组合视觉刺激下, O2 电极的 P100 波形的峰值及平均振幅显著高于其他 3 种亮度对比及颜色组合。**结论** 车载信息系统界面中的信息元素与界面背景应优先使用高亮度对比 (18 : 1), 色彩搭配方面应选取黑色或蓝色作为背景色、黄色或白色作为图标文字等信息元素的颜色。

关键词: 车载信息系统界面; 事件相关电位; 亮度对比; 颜色组合; 认知绩效

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)10-0108-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.10.012

Effects of Luminance Contrast and Color Combinations on IVIS Interface Cognition

WU Zheng-xin, JIN Tao, GU Hao-ran, MING Cheng-ye

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum (East China),
Shandong Qingdao 266580, China)

ABSTRACT: The paper aims to analyze the cognitive mechanism of luminance contrast and color combination in the in-vehicle information system interface. Based on the perceptual load paradigm, in experiment A, with the experimental materials of 16 color combinations of four luminance contrast levels (6 : 1, 9 : 1, 12 : 1, and 18 : 1), the error rates under high, medium, and low loads were analyzed. In experiment B, an EEG research on the basis of experiment A was conducted. Experiment A: Under high and medium loads, the luminance contrast of 18:1 reduced the target search error rate significantly, while yellow on black, yellow on blue, and white on blue were the three color combinations with the lowest search error rate. However, there is no significant effect under low load. Experiment B: The topographic map of the brain area showed that under the 18 : 1 luminance contrast and color combination visual stimulation, the brain areas of the occipital lobe, prefrontal lobe and temporal lobe were more activated. Compared with low load, the brain regions of high and medium load were less activated. ERP analysis found that under the 18 : 1 luminance contrast and color combination visual stimulation, the peak value and average amplitude of the P100 curve of the O2 electrode were significantly higher than the other three luminance contrast and color combinations. High luminance contrast (18 : 1) should be preferred for information elements and interface background in the interface of in-vehicle information system. In terms of color matching, black or blue should be selected as the background color, and yellow or white as the color of information elements such as icon and text.

KEY WORDS: IVIS interface; ERP; Luminance contrast; color combinations; cognitive performance

收稿日期: 2021-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52075547)

作者简介: 吴正新 (1997—), 男, 硕士生, 主攻工业设计。

通信作者: 金涛 (1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为工业设计。

85%的重大交通事故是由人为失误直接造成的^[1], 驾驶员对车载数字界面操作时间过长是引发交通事故的重要因素之一。关键目标信息的搜索速度决定了人机界面的使用效率^[2], 例如观察战机界面、监视核电站的工作状态及军事作战系统等, 亮度对比及颜色组合是影响以上操作认知表现的重要因素。在车载数字界面中, 合理的亮度对比及颜色组合可以增强显示效果, 减少驾驶员分心时间; 不当的亮度对比及颜色组合极易分散驾驶员的注意力, 甚至威胁行车安全。由此可见, 亮度对比及颜色组合是影响车载界面认知绩效的重要因素。

亮度对比会严重影响数字界面信息元素的视觉效果。Raimundo 等^[3]发现清晰度受对比度的影响显著, 清晰度随着对比度的增强而提高。当操作者执行视觉搜索任务时, 低对比度会使其视觉敏感度降低, 操作者将难以感知人类的面部信息或道路标志^[4-5]。Shieh 等^[6]在视觉认知研究中发现, 高亮度对比可以显著提升目标信息搜索速度。Ojanpää 等^[7]指出, 随着字符和背景之间亮度对比的降低, 视觉搜索时间随之增加。在数字界面中, 关键信息的视觉效果随对比度的增加而增强^[8]。Huang^[9]发现可以通过更高的亮度对比来增强图标的清晰度。颜色组合也会严重影响数字界面信息元素的认知绩效。有专家研究发现^[10], 在蓝色背景上带有白色文本的文档会产生最佳的阅读效果, 红色背景上的蓝绿色文字会显著降低阅读速度。Michalski^[11]指出, 颜色组合对任务结果准确率具有显著影响。相应地, 如果字符和背景两者间的亮度对比比较小, 则较高的颜色对比度不能保证快速的视觉感知^[7]。Bhattacharyya 等^[12]研究发现, 在正图像极性下(在较高亮度的彩色背景上显示较低亮度的彩色图像), 白色背景上使用蓝色和红色字符时识别性最强; 在负图像极性下(在较低亮度的彩色背景上显示较高亮度的彩色图像), 白色是蓝色和绿色背景上最易识别的颜色。Humar 等^[13]研究发现, LCD 显示器中负极性的颜色组合认知绩效最高。Buchner 等^[14]研究发现文本-背景极性会影响认知绩效, 但与环境照明和颜色组合无关。在车载信息系统界面中一些学者也做了相关研究, 如 Peng 等^[15]发现了与 IVIS 界面相关的文本特征(例如字符数、字体、颜色)会影响驾驶绩效。Pritchard 等^[16]在模拟驾驶中的研究表明, 亮度与驾驶绩效存在相关性。Lavie 等^[17]基于车载显示器的研究, 证明了颜色对界面搜索效率有重要影响。

综上所述, 大多数学者对组合图标的亮度或颜色等单个特征的影响机理进行了研究, 或是对车载信息系统界面的其他影响机理进行了研究, 而在车载信息系统界面中对亮度对比及颜色组合的研究较少。在实验方面, 已有研究大多分离了亮度和颜色特征, 因此难以研究颜色组合及亮度对比的组合效应及机理。为更加符合现实应用场景, 并全面探究亮度对比及颜色组合对车载数字界面功能区组合图标认知绩效的影

响机理, 文中参照国际照明委员会的 16 种颜色组合及 4 种亮度对比作为实验材料, 来探究车载数字界面中亮度对比及颜色组合对认知绩效的影响。

已有研究表明^[18-19], 对比度、亮度等视觉刺激间的差异可以诱发 P100 成分, P100 成分通常在枕区(O1、O2)幅度最大, 峰值潜伏期在 100 ms 左右, 并受刺激对比度的显著影响。因此, 文中基于现有研究成果及相关理论分析作出以下假设: 当出现高亮度对比及颜色组合时将诱发 P100 波形; 高亮度对比及颜色组合的认知绩效较高; 亮度对比及颜色组合的目标搜索正确率与 P100 波形振幅存在相关性。

1 实验设计

笔者根据视觉搜索实验, 研究了不同载荷下亮度对比及颜色组合对认知绩效的影响, 共设计了 2 种实验: 亮度对比及颜色组合实验(实验 A), 将不同载荷下 4 种亮度对比及 16 种颜色组合的错误率进行对比分析, 探索不同载荷下亮度对比及颜色组合对认知绩效的影响; 脑电实验(实验 B), 深入探索亮度对比及颜色组合的脑神经机制, 并解释行为实验的推断。

2 亮度对比及颜色组合实验

2.1 被试者

20 名在校(10 名男生和 10 名女生)参加了该实验。所有被试者年龄在 20~24 岁($M=22, SD=1.38$), 均具有一年以上的驾龄, 视力正常。被试者在此之前未参加过相似实验, 且不知晓实验用意, 实验结束将得到相应奖励。

2.2 实验器材

实验中被试者驾驶了易驾里模拟驾驶器, 还包括一个 21 寸显示屏、一个 12.9 寸的车载显示屏、一个力反馈转向系统、可调节的方向盘、五速变速箱、油门踏板及制动器和离合器的踏板组。为减少手动换挡对实验的影响, 实验中模拟器均调节成自动挡驾驶模式。

实验材料^[20]根据数量均匀分布在实验画面中(见图 1), 实验刺激所用的图标颜色是基于国际照明委员会坐标三角形的顶点和基点含有的 6 种彩色: 红色(R)、绿色(G)、蓝色(B)、黄色(R 和 G)、蓝绿色(G 和 B)和紫色(R 和 B), 在此基础上添加了黑色及白色, 使用 Minolta CS200 色彩分析仪来测量 CIE 颜色值和亮度, 对应的 CIE 色度坐标见表 1。利用 7 点主观量表对图标材料的情绪唤醒进行打分, 筛选出语义明确且没有负面或愉悦感的中性图标, 所有图标都是含义明确的常见抽象填充形图标, 视觉刺激呈现在 12.9 寸的模拟车载屏幕中央, 不同数量的呈现方式见图 2, 其分辨率为 2732*2048, 室内照明条件正常(300 lux)。



图1 图标素材
Fig.1 Graphic material

表1 实验所用8种颜色及其对应CIE色度坐标
Tab.1 List of 8 colours used in the experiment and their corresponding CIE chromaticity coordinates

色彩	CIE(x,y)		亮度 (cd/m ²)	
	x	y		
背景	黑色	0.31	0.32	5.0
	蓝色	0.14	0.07	5.0
	红色	0.72	0.24	10.0
	紫色	0.36	0.17	10.0
目标	绿色	0.31	0.50	60.0
	蓝绿色	0.21	0.38	60.0
	黄色	0.43	0.46	90.0
	白色	0.31	0.32	90.0



图2 素材布局
Fig.2 Layout of experimental materials

2.3 实验流程

被试者在驾驶时需要执行视觉搜索任务,其中驾驶任务包括速度控制和车道保持控制。被试者通过前监视器上提供的车速信息来执行速度控制任务,通常车速保持在50~60 km/h。为避免过高的驾驶难度,要求被试者在三车道高速公路的中间车道行驶并保持不变。实验中大部分为直线路段,仅有2个弯道路段;由于需要模拟真实道路场景,所以在道路两侧设有服务区,经过服务区的路段会变为四车道道路。实验中利用“Unity3D”2020软件构建了模拟驾驶场景。此次实验使用了10%的车流量强度,在平坦的道路上模拟了车流量较少的交通情况,除了被试者的车辆外,几乎没有其他车辆,其他车辆也不会干扰驾驶员驾驶的中间车道,为减少实验干扰,在实验过程中未将此事告知被试者,只是叮嘱他们小心驾驶。

为选取最佳视觉刺激的呈现方式(如图2),预实验采用4(呈现方式)×3(认知载荷)×16(颜色组合)×4(亮度对比)被试内设计。结果表明,当素材布局数量为4~6个时,错误率具有显著性差异($p < 0.05$),且素材布局为4时的错误率较低,因此将实验材料数量确定为4个。

实验利用3(载荷:高、中、低)×4(亮度对比)×

16(颜色组合)被试内设计。8种颜色均在负极性图像显示(较高亮度的彩色图像显示在较低亮度的彩色背景上),实验共16种目标/背景色组合,通过对比度(L_{High}/L_{Low})计算出16种颜色组合的亮度对比,并分为4个等级:6:1、9:1、12:1和18:1,见表2。根据视觉显示终端(VDT)上16种颜色组合的色彩饱和度设置了亮度对比度值,因此亮度对比度取决于颜色组合结果。视觉刺激呈现在表2所对应的背景上,首先灰色的注视点“+”在屏幕中央出现1500 ms,呈现时间在200 ms(高载荷)、600 ms(中载荷)、1000 ms(低载荷)中随机出现,随后出现全屏黑色界面并保持1000 ms,以消除目标图标视觉残差,要求被试者尽可能地记忆图标集,若目标图标出现,则按方向盘左侧任意键,若不出现,则按方向盘右侧任意键。若被试者在按键反应后或3000 ms内未作出反应,则进入下个试次的注视点画面。正式的实验包括384个试次,为避免被试对结果进行预期,亮度对比及颜色组合将混合均等出现。整个实验进程将持续30 min左右,实验流程见图3。

表2 16种颜色组合及其亮度对比
Tab.2 Luminance contrast settings for the sixteen colour combinations

颜色组合	亮度对比
绿/紫	6:1
蓝绿/紫	6:1
绿/红	6:1
蓝绿/红	6:1
黄/紫	9:1
白/紫	9:1
黄/红	9:1
白/红	9:1
绿/蓝	12:1
蓝绿/蓝	12:1
绿/黑	12:1
蓝绿/黑	12:1
黄/蓝	18:1
白/蓝	18:1
黄/黑	18:1
白/黑	18:1

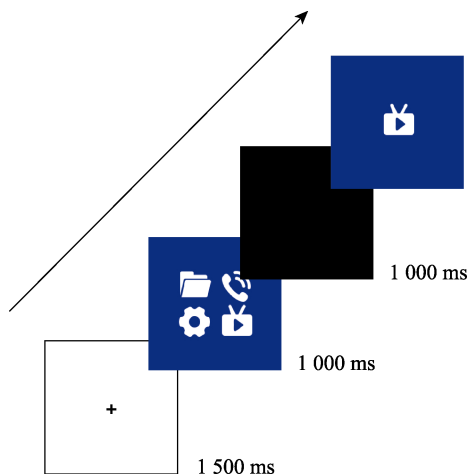


图 3 实验流程
Fig.3 Flow of experiment

2.4 实验结果

将颜色组合错误率利用重复测量方差进行分析, 结果如下。在高载荷下, 颜色组合主效应显著, $F=10.25, p<0.01$ 。亮度对比主效应显著, $F=50.48, p<0.01$ 。亮度对比与颜色组合之间交互作用不显著, $p>0.05$ 。对颜色组合主效应进行事后多重比较表明: 黄/蓝、黄/黑、白/蓝 3 种颜色组合的平均错误率显著低于其他颜色组合; 黄/紫、蓝绿/蓝 2 种颜色组合的错误率显著高于其他颜色组合, 见图 4。对亮度对比主效应进行多重比较的结果表明: 18 : 1 亮度对比的平均错误率显著低于其他亮度对比, 见图 5。

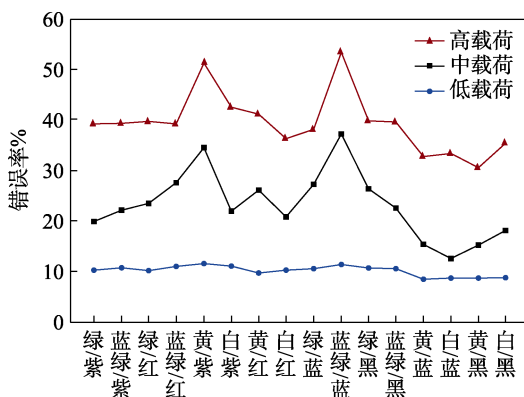


图 4 颜色组合平均错误率
Fig.4 Average error rate of color combination

在中载荷下, 颜色组合主效应显著, $F=8.43, p<0.05$ 。亮度对比主效应显著, $F=41.52, p<0.05$ 。亮度对比与颜色组合之间交互作用不显著, $p>0.05$ 。对颜色组合主效应进行事后多重比较表明: 黄/蓝、黄/黑、白/蓝 3 种颜色组合的平均错误率显著低于其他颜色组合; 黄/紫、蓝绿/蓝 2 种颜色组合错误率显著高于其他颜色组合, 见图 4。将亮度对比主效应进行事后多重比较的结果表明: 18 : 1 亮度对比的平均错误率显著低于其他亮度对比, 见图 5。

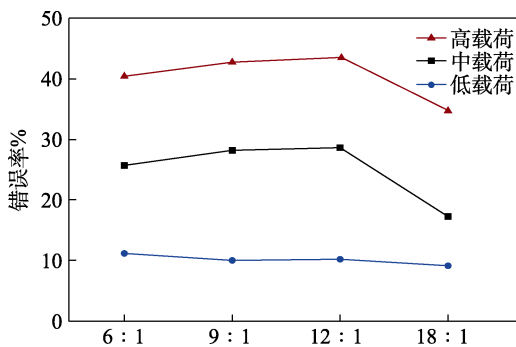


图 5 亮度对比平均错误率
Fig.5 Average error rate of luminance contrast

在低载荷下, 颜色组合主效应不显著, $F=5.36, p>0.05$ 。亮度对比主效应不显著, $F=34.67, p>0.05$ 。亮度对比与颜色组合之间交互作用不显著, $p>0.05$ 。对颜色组合主效应进行事后多重比较表明: 16 种颜色组合间平均错误率无显著差异, 见图 4。将亮度对比主效应进行事后多重比较的结果表明: 4 种亮度对比间平均错误率均无显著差异, 见图 5。

2.5 结果分析

由实验结果可知, 在高载荷与中载荷下, 黄/蓝、黄/黑、白/蓝 3 种颜色组合的图标搜索错误率最低, 而黄/紫、蓝绿/蓝 2 种颜色组合的搜索错误率较高, 这与 Luria 等^[21-22]关于文字搜索与背景颜色研究的结论相似; 亮度对比中 18:1 的搜索错误率最低, 6 : 1、9 : 1 和 12 : 13 种亮度对比搜索错误率无显著差异。然而, 在低载荷下, 亮度对比及颜色组合错误率均较低, 搜索错误率无显著差异。为深入研究亮度对比及颜色组合对认知绩效的影响, 实验 B 在实验 A 的基础上加入了脑电研究, 从而进一步解释亮度对比及颜色组合对认知绩效的影响机理。

3 脑电实验

3.1 参与者

20 名在校大学生 (10 名男生和 10 名女生), 所有被试者年龄在 20~24 岁 ($M=22.6, SD=1.14$), 所有被试者均未参加以上实验, 其余被试者要求与实验 A 保持一致。

3.2 实验材料、过程

实验是在隔音、防磁和亮度可调的 ERP/行为实验室中完成的。实验 B 的材料及流程均与实验 A 一致。

3.3 ERP 结果

采用 MATLAB 分析连续 EEG, 并对脑电数据进行预处理。在数据的分析过程中, 将眼电或其他突出的伪影数据进行消除, 共消除 10% 的伪影数据。亮度对比及颜色组合在不同载荷下的脑地形图见图 6。在高载荷下, 6 : 1、9 : 1 和 12 : 1 亮度对比及颜色组

合显著激活了枕叶脑区; 18 : 1 亮度对比及颜色组合显著激活了枕叶和前额叶。在中载荷下, 6 : 1、9 : 1 和 12 : 1 的亮度对比及颜色组合激活了枕叶和前额叶脑区; 18 : 1 亮度对比及颜色组合显著激活了枕叶、右颞叶和前额叶。在低载荷下, 4 种亮度对比及颜色组合均显著激活了枕叶、颞叶和额叶区域。

根据相关学者的研究, 视觉成分主要分布在顶叶和枕叶^[23-24]。因此, 选取顶区 (P3、Pz、P4)、枕区 (O1、O2) 作为分析电极, 选择 ERP 振幅在 50~150 ms^[25] 的片段作为时间窗, 采用 3(1 000 ms, 600 ms, 200 ms) × 5 (电极) 重复测量并分析 P100 组分。结

果表明, 时间载荷和电极之间交互作用不显著, $F=1.96, p>0.05$; 电极主效应显著, $F=41.61, p<0.01$; 时间载荷的主效应显著, $F=12.36, p<0.05$; 事后分析显示, O2 电极部位引起的平均振幅显著高于其他部位。图 7 显示了 O2 电极在 3 种载荷下的平均 P100 波形, 高、中载荷下 18:1 亮度对比及颜色组合 P100 波形的峰值及平均振幅显著高于其他 3 种亮度对比及颜色组合, 不同亮度对比后期趋势较为相似。在低载荷下, 不同亮度对比下 P100 波形的峰值无显著差异。此外, 在低载荷下 P100 波形峰值及平均振幅显著大于中、高载荷。

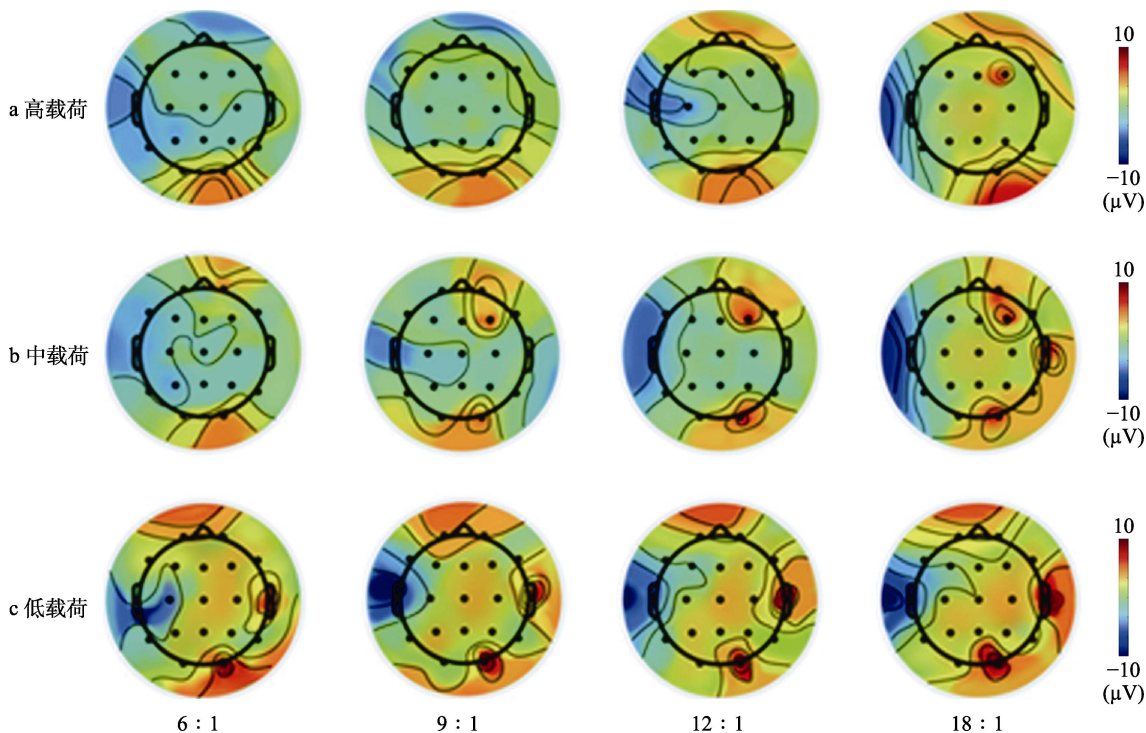


图 6 亮度对比及颜色组合在不同载荷下的脑地形图
Fig.6 Brain topographic map of luminance contrast and color combination under different loads

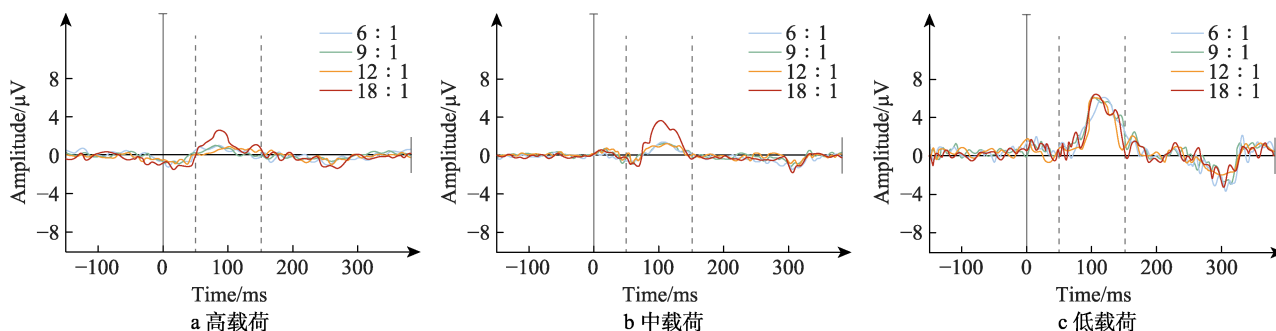


图 7 O2 电极亮度对比及颜色组合 ERP 波形
Fig.7 O2 electrode luminance contrast and color combination ERP waveform

3.4 ERP 结果分析

高载荷下视觉刺激的呈现时间较短, 因此 6 : 1、9 : 1 和 12 : 1 亮度对比及颜色组合中视觉刺激信息量较多与较短的认知时间发生冲突, 导致枕叶脑区大

面积被激活, 而 18 : 1 亮度对比及颜色组合使认知绩效得到显著提高, 此时的枕叶和额叶均被激活。在中载荷下, 识别时间偶有空余, 6 : 1、9 : 1 和 12 : 1 亮度对比及颜色组合中前额叶均被显著激活; 18 : 1

亮度对比及颜色组合促进了认知绩效的提高, 此时的枕叶、额叶和颞叶均被激活。在低载荷下, 亮度对比及颜色组合的呈现时间较充裕, 被试者有时间进行思考、判断和记忆等, 脑区激活度相似。根据有关学者的^[26]研究, 视觉中枢位于距状裂两侧的枕叶皮质内, 枕叶区被优先激活, 随后激活额叶与颞叶, 额叶皮质区与大脑中的高级思维活动存在一定的关联性^[27], 其主要功能有判断、分析、记忆和思考等功能, 颞叶皮质区主要功能有理解、记忆、联想等功能。由此可见, 枕叶、前额叶和颞叶共同参与视觉信息的存储记忆^[28], 其中枕叶区在亮度对比和颜色组合的视觉加工中起重要作用。

由图 6 和图 7 可知, 在高载荷下, 不同亮度对比及颜色组合的 O2 电极 ERP 波形变化趋势相似, 18 : 1 亮度对比及颜色组合对枕叶激活程度最高, 其 P100 波形峰值及平均振幅显著高于其他水平的亮度对比; 在中载荷下, 18 : 1 亮度对比及颜色组合对枕叶及前额叶激活程度最高, 其 P100 波形峰值及平均振幅显著高于其他水平的亮度对比; 在低载荷下, 实验视觉刺激对枕叶、颞叶及前额叶激活程度趋于一致。由此可推断出, 目标搜索错误率与 P100 波形峰值及平均振幅存在相关性, 激活程度越高, 目标搜索错误率越低。

4 讨论

文中利用心理学实验中的记忆回溯范式, 来研究车载界面中亮度对比及颜色组合对认知绩效的影响。此次研究较先前实验设计了更加严格、精确的实验方法, 主要包括以下方面: 参照国际照明委员会的 16 种颜色组合及 4 种亮度对比作为实验材料, 来探究车载界面中亮度对比及颜色组合的最佳配置; 模拟驾驶过程中的视觉刺激, 通过高、中、低 3 种时间载荷随机出现, 以降低被试对知觉负载情况的预期; 利用脑电生理实验技术对行为实验结果进行验证, 以降低实验结果的偶然性。以上措施使呈现的实验素材更加全面且不可预测, 更加符合真实生活中的情况, 实验结果也更为稳定, 真实反映了 3 种时间载荷下驾驶者对亮度对比及颜色组合的加工过程及认知机制。

在实验 A 图标搜索识别方面, 被试者处于高、中载荷时, 18 : 1 亮度对比的错误率显著低于 6 : 1、9 : 1、12 : 1 亮度对比的错误率, 黄/蓝, 黄/黑, 白/蓝 3 种颜色组合显著降低了图标搜索错误率, 而黄/紫、蓝绿/蓝 2 种颜色组合下的图标搜索错误率显著升高。说明在负图像极性下, 较高的亮度对比及颜色组合可以显著提高认知绩效。被试者处于低载荷时, 亮度对比及颜色组合的错误率均无显著差异。然而, 根据行为实验无法对实验 A 的结果做出有效解释, 因此在实验 B 中利用脑电实验, 成功在枕区 O2 电极处诱发了 P100 成分, 验证了此次研究中的 3 个假设, 解释了行为实验的结果。在高、中载荷下, 16 种颜色组

合构成的视觉刺激中亮度对比越高, 枕叶脑区的激活程度越高, 目标搜索错误率越低, 因此 18 : 1 水平下亮度对比及颜色组合高于其他 3 种水平, 此时的 P100 波形峰值及平均振幅最高。在低载荷下, 脑区激活程度趋于一致, P100 波形峰值及平均振幅也无显著差异, 因此目标搜索错误率无显著差异。

5 结语

根据此次的研究结果可以提出相应的设计准则: IVIS 界面信息元素与界面背景应使用高亮度对比 (18 : 1), 在紧急情况下, 使用高亮度对比能显著降低驾驶者搜索错误率, 从而有效降低其驾驶中的事故率; IVIS 界面设计中应选取黑色或蓝色作为背景色, 优先使用黄色或白色作为图标文字等信息元素的颜色; 车载数字界面中应避免使用黄/紫、蓝绿/蓝的颜色组合, 不恰当的颜色组合可能会影响驾驶员的判断与决策。由于颜色组合错综复杂, 在今后的研究中, 需要进一步深入分析亮度对比和颜色组合对驾驶员认知绩效的影响机理, 以及其与脑认知神经机制间的映射关系, 并建立认知绩效与驾驶状态的疲劳曲线及定量分析模型。

参考文献:

- [1] HAN W L, ZHAO J Y. Driver Behaviour and Traffic Accident Involvement among Professional Urban Bus Drivers in China[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2020(74): 184-197.
- [2] 支锦亦, 杜洋, 冯纾. 车载信息系统界面图文设计及其视认知特性研究综述[J]. 包装工程, 2020, 41(10): 62-70.
ZHI Jing-yi, DU Yang, FENG Shu. Review on the Graphic Design and Perceptual Characteristics of Auto-bile System Interface[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(10): 62-70.
- [3] RAIMUNDO J, BEATRIZ R, RUBÉN M, et al. Short-term Effects of Text-background Color Combinations on the Dynamics of the Accommodative Response[J]. Vision Research, 2020(166): 33-42.
- [4] BOUCART M, DINON J F, DESPRETZ P, et al. Recognition of Facial Emotion in Low Vision: A Flexible Usage of Facial Features[J]. Vis Neuro, 2008, 25(4): 603-609.
- [5] CHIN C L. Effects of Contrast Ratio and Text Color on Visual Performance with TFT-LCD[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2003.
- [6] SHIEH K, LIN C. Effects of Screen Type, Ambient Illumination, and Color Combination on VDT Visual Performance and Subjective Preference[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2000, 26(5): 527-536.
- [7] OJANPÄÄ H, NÄSÄNEN R. Effects of Luminance and

- Colour Contrast on the Search of Information on Display Devices[J]. *Displays*, 2003(24): 167-178.
- [8] LIN C. Effects of Screen Luminance Combination and Text Color on Visual Performance with TFT-LCD[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2005, 35(3): 229-235.
- [9] HUANG S. Legibility of Small Icons with Color Combinations in Small Displays[J]. *Perceptual and Motor Skills*, 2007, 104(1): 191-200.
- [10] RAMADAN M Z. Evaluating College Students Performance of Arabic Typeface Style, Font Size, Page Layout and Foreground Background Color Combinations of E-book Materials[J]. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2011, 23(2): 89-100.
- [11] MICHALSKI R. The Influence of Color Grouping on Users Visual Search Behavior and Preferences[J]. *Displays*, 2014, 35(4): 176-195.
- [12] BHATTACHARYA D, CHOWDHURY B T. Selection of Character Background Colour Combinations for On-screen Searching Tasks: An Eye Movement, Subjective and Performance Approach[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2014, 35(3): 101-109.
- [13] HUMAR I, GRADIS'AR M, TURK T, et al. The Impact of Color Combinations on the Legibility of Text Presented on LCDs[J]. *Applied Ergonomics*, 2014, 45(6): 1510-1517.
- [14] BUCHNER A, BAUMGARTNER N. Text-background Polarity Affects Performance irrespective of Ambient Illumination and Colour Contrast[J]. *Ergonomics*, 2007, 35(7): 1036-1063.
- [15] PENG Y Y, BOYLE L N, LEE J D. Reading, Typing, and Driving: How Interactions with In-vehicle Systems Degrade Driving Performance[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2014(27): 182-191.
- [16] PRITCHARD S J, HAMMETT S T. The Effect of Luminance on Simulated Driving Speed[J]. *Vision Research*, 2012, 52(1): 54-60.
- [17] LAVIE T, ORON G T, MEYER J. Aesthetics and Usability of In-vehicle Navigation Displays[J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2011, 69(12): 80-99.
- [18] CARMEL D, BENTIN S. Domain Specificity Versus Expertise: Factors Influencing Distinct Processing of Faces[J]. *Cognition*, 2002, 83(1): 1-29.
- [19] 赵仑. ERPs 实验教程[M]. 南京: 东南大学出版社, 2010.
- ZHAO Lun. ERPs Experimental Course[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2010.
- [20] KO Y H. The Effects of Luminance Contrast, Colour Combinations, Font, and Search Time on Brand Icon Legibility[J]. *Applied Ergonomics*, 2017(65): 33-40.
- [21] LURIA S, NERI C. Schlichting Performance and Preference with Various VDT Phosphors[J]. *Applied Ergonomics*, 1989(20): 33-38.
- [22] 余姝姝. 基于老年人认知的应用程序界面图标设计研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
- YU Shu-shu. Research on Application Interface Icon Design Based on Cognition of the Elderly[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2017.
- [23] VOGEL E K, MCCOLLOUGH A W, MACHIZAWA M G. Neural Measures Reveal Individual Differences in Controlling Access to Working Memory[J]. *Nature*(438): 500-503.
- [24] 魏景汉, 罗跃嘉. 事件相关电位原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- WEI Jing-han, LUO Yue-jia. Principle and Technique of Event-Related Brain Potentials[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [25] FUKUZUMI S, YAMAZAKI T, KAMIJO K, et al. Physiological and psychological evaluation for visual display colour readability: a visual evoked potential study and a subjective evaluation study[J]. *Ergonomics*, 2010, 41(5): 89-108.
- [26] ZHANG B, HE S, WENG X C. Localization and Functional Characterization of an Occipital Visual Word Form Sensitive Area[J]. *Scientific Reports*, 2018(8): 6723.
- [27] BADRE D, NEE D E. Frontal Cortex and the Hierarchical Control of Behavior[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2018, 22(2): 170-188.
- [28] 金涛, 郎小翠, 牛亚峰, 等. 颜色和图标编码的组合效应对认知绩效的影响[J]. *东南大学学报*, 2020, 50(4): 721-727.
- JIN Tao, LANG Xiao-cui, NIU Ya-feng, et al. Effect of the Color and Graphic Coding Combination on Cognitive Performance[J]. *Journal of Southeast University*, 2020, 50(4): 721-727.

责任编辑: 马梦遥