

基于稳态视觉诱发电位的脑机接口元素尺寸和间距工效学研究

牛亚峰^{*①} 王佳浩^① 伍金春^① 薛澄岐^① 杨文骏^②

^①(东南大学机械工程学院 南京 211189)

^②(飞行器控制一体化技术国防科技重点实验室 西安 710018)

摘要: 针对基于稳态视觉诱发电位(SSVEP)的脑机接口系统,该文开展了屏显刺激界面元素尺寸和间距对识别效率和用户体验影响的工效学实验研究。该工效学实验使用红色正方形作为频闪刺激元素,刺激元素位于上、下、左、右等4个位置,自变量包含尺寸和间距两个因素。因素1为尺寸即正方形边长,分为100px, 150px, 200px 3个水平;因素2为间距即元素中心与界面中心的垂直/水平距离,分为200px/400px, 300px/600px, 400px/800px 3个水平。因变量为任务的完成时间和失败次数。实验后开展主观评价,基于ISO 9241可用性标准,使用李克特7分量表对界面的满意度进行评分。工效学实验结果显示:元素尺寸对识别效率有显著影响,边长尺寸为200px的刺激元素识别效率最高,元素间距对识别效率没有影响。主观评价结果显示:元素间距对用户满意度有显著影响,刺激元素的紧凑(200px/400px)或疏远(400px/800px)都会导致满意度的下降,300px/600px间距水平的满意度最好,尺寸对用户满意度没有显著影响。该研究从设计工效学角度出发,发现了刺激界面元素尺寸、间距分别对脑机接口系统效率、用户满意度具有影响,研究结论对于规范脑机接口界面设计,提升脑机接口系统效率有重要的指导意义和借鉴价值。

关键词: 脑机接口; 稳态视觉诱发电位; 工效学; 尺寸; 间距

中图分类号: TN911.7; TP302

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)02-0455-09

DOI: 10.11999/JEIT211040

Ergonomic Study on Element Size and Spacing of Brain Computer Interface Based on SSVEP

NIU Yafeng^① WANG Jiahao^① WU Jinchun^① XUE Chengqi^① YANG Wenjun^②

^①(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

^②(National Key Laboratory of Science and Technology on Aircraft Control, Xi'an 710018, China)

Abstract: For the SSVEP-BCI, an ergonomic study is carried out on the effects of stimulation interface element size and spacing on recognition efficiency and user experience. In this experiment, the red squares are used as the stimulation elements. The squares are located on the upper, lower, left and right positions. The independent variables include two factors: size and spacing. Factor 1 (size) is the side length of the square, which is divided into three levels: 100px, 150px, and 200px; Factor 2 (spacing) is the vertical/horizontal distance between the element center and the interface center, which is divided into three levels: 200px/400px, 300px/600px, and 400px/800px. The dependent variables are the completion time and the number of failures of the tasks. Subjective evaluation is carried out after the experiment. Based on ISO 9241 usability standard, Likert 7-point scale is used to score the participants' satisfaction of the interfaces. The results of the ergonomics experiment show that the element size has a significant impact on the recognition efficiency, the stimulation element with side length of 200px has the highest recognition efficiency, while the element spacing has no impact. The subjective evaluation results show that element spacing has a significant impact on user satisfaction. The compactness (200px/400px) or alienation (400px/800px) of stimulating elements will lead to the

收稿日期: 2021-09-27; 改回日期: 2022-01-10; 网络出版: 2022-01-21

*通信作者: 牛亚峰 nyf@seu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(71801037, 72171044, 71871056), 航空科学基金(20200058069002), 东南大学“至善青年学者”支持计划
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (71801037, 72171044, 71871056), Aerospace Science Foundation of China (20200058069002), Southeast University “Zhi Shan Qing Nian Xue Zhe” Support Program Funding

decline of satisfaction. The satisfaction of 300px/600px spacing level is the best, while the size has no impact. From the perspective of design ergonomics, it is found that the size and spacing of stimulating interface elements have an impact on the efficiency of SSVEP-BCI system and user satisfaction respectively. The research conclusion has guiding and reference value for standardizing the design of SSVEP-BCI and improving the efficiency of SSVEP-BCI system.

Key words: Brain Computer Interface(BCI); Steady-State Visual Evoked Potentials (SSVEP); Ergonomics; Size; Spacing

1 引言

脑机接口(Brain-Computer Interface, BCI)是一种测量中枢神经系统活动并将其转换为人工输出的系统,可替代、恢复、增强、补充或改善中枢神经系统的自然输出,从而改变中枢神经系统与其外部或内部环境之间的持续交互作用,故对BCI的研究使得人体与外界的交互形式增多,利于提升残障人士的生活福祉。当前,BCI研究领域的关注点主要在以下3个方面:创新信号采集硬件、优化信号处理、探索应用场景等^[1]。在创新信号采集硬件上, Lee等人^[2]报告了可以自主执行神经传感和电微刺激的无线联网与供电电子微芯片,实现了单独电极的灵活放置。Afanasenkau等人^[3]提出了一种软生物电子植入物的快速原型制作技术,可以快速印刷柔软的生物相容性材料,用于需要定制电极阵列的原型设计。在优化信号处理上, Sani等人^[4]开发了优先子空间识别PSID,是一种对神经活动进行建模的算法,同时对其行为相关的动态进行分离和优先排序。罗志增等人^[5]提出一种结合脑功能网络和样本熵的特征提取方法,实现了更优的左右手运动想象分类效果。徐宝国等人^[6]提出了一种基于小波分析和AR模型的脑电信号特征提取方法,为在线BCI系统的研究提供了新的思路。吴明权等人^[7]针对单通道脑电提出一种基于长时差分振幅包络与小波变换的眼电干扰自动分离方法,能够高效地检测出几乎所有的眼电伪迹和大强度的其他伪迹。高诺等人^[8]针对脑卒中开发了基于脑机接口技术的上下肢康复系统,有效解决了传统康复疗法中存在被动介导的问题。在探索应用场景上, Li等人^[9]为脑控移动机器人开发了一个鲁棒的非线性预测控制器,提高了系统的整体性能。Willett等人^[10]开发了一种皮层内BCI,解码来自运动皮层神经活动的手写动作尝试,并将其实时转换为文本。Moses等人^[11]从瘫痪失语的患者运动皮层活动中解码出完整句子。

典型BCI系统根据脑电来源不同,有运动想象^[12]、稳态视觉诱发电位(Steady-State Visual Evoked Potential, SSVEP)^[13]、P300^[14]等种类。其中基于SSVEP的BCI比运动想象准确度高,比

P300输出指令快^[15],故其泛用性更好,本文选择基于SSVEP的BCI系统作为研究对象。

SSVEP是视觉刺激诱发的枕叶相应的脑电活动^[16]。刺激呈现是SSVEP-BCI的关键环节^[17],刺激呈现方式有光源(LED灯、荧光灯和氙气灯等)和屏幕(CRT和LCD等)^[18],因显示器具有显示内容高自由度的特征,使用屏显刺激的SSVEP-BCI被广泛开发。SSVEP-BCI的屏显刺激范式可以分为3类:(1)简单闪烁刺激:单个刺激元素在屏幕上的出现和消失^[19];(2)图形模式反转刺激:例如棋盘格,模式反转刺激可以诱发更明显的脑电响应^[20];(3)明暗刺激:刺激元素在深色与浅色之间切换,两种颜色的明度需要有明显的对比,例如红色与黑色^[21]。目前SSVEP-BCI已应用在输入法^[22]、射击游戏^[23]、虚拟小车^[24],智能轮椅^[25]等场景。

目前,对于使用屏幕呈现刺激的SSVEP-BCI,研究中尚缺乏统一、规范的界面设计标准。如任泓锦等人^[26]的实验界面中,使用了5cm×10.5cm和5cm×8.1cm两种元素尺寸;李鹏海等人^[27]报告了一种元素尺寸为2.7 cm×2 cm的SSVEP拨号键盘。陈景霞等人^[28]设计的游戏则以8×8的矩阵将界面元素充满整个屏幕。从人机交互的工效学角度出发,对交互界面的研究能提升交互系统的效率和用户体验^[29],但目前对SSVEP-BCI刺激界面的工效学研究尚不充分。例如Ng等人^[30]认为刺激元素间距在视角5°以下性能不佳;Ravi等人^[31]认为刺激元素间距离与SSVEP解码性能之间存在正相关;而Duszyk等人^[32]研究发现,元素尺寸对SSVEP有线性影响,SSVEP功率随着元素尺寸的增大而增加,在视角5°以下,刺激间距对SSVEP没有影响。

本文针对SSVEP-BCI屏显界面刺激元素的尺寸和间距进行了量化的工效学实验,旨在探究操作效率和用户体验较优的界面元素尺寸和间距范围,并提出以下假设:

(1)刺激元素的尺寸对识别效率有影响,更大的尺寸会有更高的识别效率。

(2)刺激元素的间距对识别效率有影响,更大的间距会有更高的识别效率。

(3)刺激元素的尺寸和间距对用户体验有影响,更大的尺寸和间距会有更高的用户满意度。

2 实验设计

2.1 受试者

20名东南大学学生参与了本次实验。受试者年龄介于22~26岁,平均年龄为23.95岁,年龄标准差为1.19。所有受试者的裸眼或矫正视力均达到4.8以上,且无眼部或脑部疾病。

2.2 实验设备与环境

本实验使用Brain Products actiCHamp脑电放大器以及easyCap脑电帽,配备61 cm 1920px×1080px分辨率、60Hz刷新率LCD显示器的Windows10系统台式计算机。本实验采用O1, O2电极作为脑电输入通道,脑电信号处理使用了开源工具OpenViBE^[33],使用共空间模式算法对脑电信号进行特征提取,将刺激频率基频和二倍频处的振幅作为特征指标。实验刺激呈现界面使用Unity开发,并通过VRPN接口与OpenViBE进行通信。本实验在光照适宜,气温恒定舒适的环境下开展,且周围没有干扰受试者的人员或声音,实验场景如图1所示。

2.3 刺激材料和实验流程

本实验使用的界面分辨率为1920px×1080px,界面背景为深灰色RGB(85, 85, 85),深灰色可以保护受试者的眼睛,减少眼部疲劳。界面上4个不同频率的刺激元素分别位于界面的上、下、左、右,图形中心与界面中心横向或纵向对齐。刺激颜

色使用了红黑交替(红: RGB 255, 0, 0; 黑: RGB 0, 0, 0),刺激频率分别为 $f_1=8.57$ Hz, $f_2=10$ Hz, $f_3=12$ Hz, $f_4=15$ Hz。刺激元素的尺寸和间距两个因素分别设置3个水平,因素1为尺寸即正方形边长,分为100px, 150px, 200px 3个水平;因素2为间距即元素中心与界面中心的垂直/水平距离,分为400px/800px, 300px/600px, 200px/400px 3个水平。刺激元素界面设计如图2所示。本实验因变量为试次的完成时和失败次数。

脑电实验开始前,受试者被要求洗头以去除头皮油脂,并严格吹干头发。实验过程中受试者正坐在屏幕前,背靠椅子,手自然放松置于腿上,保持身体固定。受试者眼睛距离屏幕中心约为65cm,受试者对屏幕的垂直视角约为25.9°,水平视角约为44.5°。为了更好地注视刺激元素,受试者仅头部的轻微转动被允许。正式实验前,BCI系统会采集受试者在尺寸200px、间距300px/600px水平下注视4个不同频率目标的脑电信号,进行特征提取



图1 实验场景

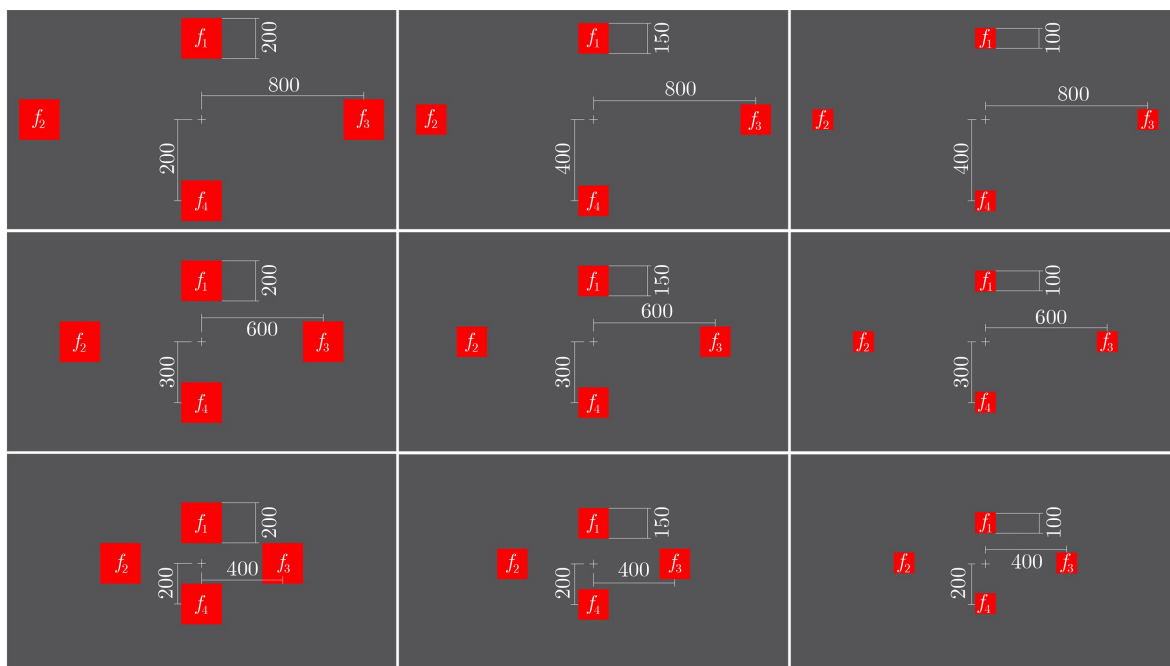


图2 刺激元素界面设计

训练。预实验共20个试次，若脑电信号的频域特征不明显(即脑电频谱图中在刺激的基频和倍频处没有明显波峰)，则排除该受试者。

正式实验中的任意一个试次的实验流程为：第1步，界面中心出现“+”，提醒受试者试次开始，受试者需要注视界面中心的“+”，1000 ms后跳转到下一步。第2步，呈现4个刺激元素，界面中心出现指示箭头。受试者根据箭头指示注视目标刺激元素，系统识别成功后记录完成时并跳转到下一步，每个试次设置8 s超时，箭头外围为环形倒计时进度条；若8 s内识别不成功则跳转到下一步，记录完成时为8s并计入失败次数。第3步，实验界面框选显示识别结果，白色指示线框在目标刺激元素上说明识别成功，否则失败，结果呈现500 ms后跳转到下一步。第4步，界面呈现深灰色空屏，持续时长为1000 ms，此步骤用于消除受试者的视觉残留。当前试次结束后进入下一个试次，每3个水平之间休息一次，整个实验休息两次，9个水平之间随机呈现，直至整个实验结束。在本实验中，每个水平进行20个试次，即每个频率的刺激元素作为目标5次，整个实验共计180个试次，实验过程大约持续40 min。单个试次的实验流程如图3所示。

2.4 参数设置依据

刺激颜色：根据Li等人^[34]的研究，红色会带来更好的SSVEP响应，所以本实验界面元素的刺激颜色使用红色RGB(255,0,0)。与之对应地，使用明度最低黑色作为辅助色。

刺激频率：因为本实验使用的显示器刷新率为60Hz，且刺激元素闪烁频率需为显示器刷新率的因数，故本实验中使用的4个频率为 $f_1=8.57$ Hz， $f_2=10$ Hz， $f_3=12$ Hz， $f_4=15$ Hz。

元素尺寸：4cm是目前SSVEP刺激元素边长的常用值^[35,36]，换算到本实验的显示器上约为150px，本实验设置边长梯度为50px，故在本实验中刺激元素边长的3个水平分别为100px，150px和200px。

元素布局：对于4个元素有2×2矩阵和上、下、左、右两种常见的布局方式。根据人的双眼视域特征及常用显示器的比例，采用横向较宽的布局形式更贴近实际^[37]；而人眼和头部在横向、纵向的移动比斜向更简便^[38]，Zambalde等人^[39]的研究也表明十字布局比矩阵布局带来更高的识别准确度，所以本实验将4个元素进行上、下、左、右且横向更宽的布局。

元素间距：需要保证最大限度利用界面尺寸，同时，元素间距取最小值时元素图形不发生干涉。在综合考虑了这两个条件后，本实验中元素间距的梯度设置为纵向100px/横向200px，间距的3个水平分别为垂直方向：200px，300px和400px；水平方向：400px，600px和800px。

2.5 实验结果与分析

完成时指1个试次中刺激元素呈现到BCI系统识别成功的时间。失败次数指在每个界面的实验中识别超时失败的试次数。工效学实验结果为：(1)尺寸100px下的200px/400px，300px/600px，

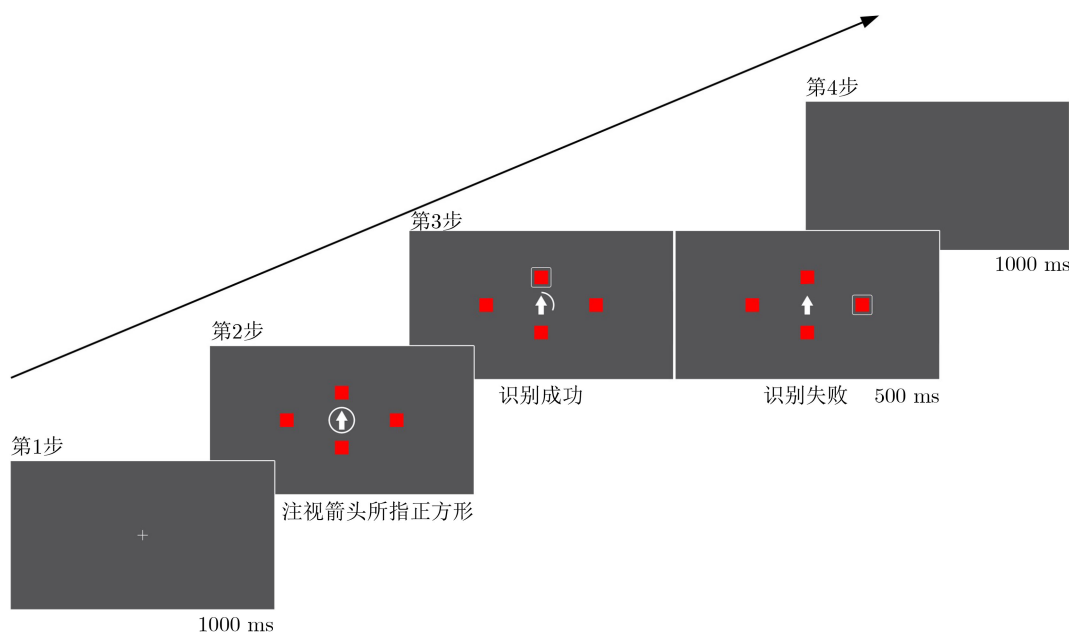


图3 单个试次实验流程图

400px/800px 3种间距的平均完成时分别为4.61s, 4.65s, 4.56s, 总失败次数分别为55, 55, 50。
 (2)尺寸150px下的200px/400px, 300px/600px, 400px/800px 3种间距的平均完成时分别为4.52s, 4.51s, 4.34s, 总失败次数分别为48, 46, 36。
 (3)尺寸200px下的200px/400px, 300px/600px, 400px/800px 3种间距的平均完成时分别为4.41 s, 4.36 s, 4.37 s, 总失败次数分别为41, 27, 41。

2.5.1 完成时统计分析

以尺寸作为因子, 对完成时进行正态性检验, $p=0.00 < 0.05$, 故以尺寸分组的完成时数据不符合正态分布, 不能进行参数检验。以尺寸为分组变量, 对完成时进行非参数检验中的K-W检验, $p=0.003 < 0.05$, 说明刺激元素尺寸变化对完成时有显著影响。以间距作为因子, 对完成时进行正态性检验, $p=0.00 < 0.05$, 故以间距分组的完成时数据不符合正态分布, 不能进行参数检验。以间距为分组变量, 对完成时进行K-W检验, $p=0.261 > 0.05$, 说明刺激元素间距变化对完成时没有显著影响。为检验两个因素(尺寸、间距)的交互作用, 对9组完成时数据进行Friedman检验, $p=0.001 < 0.05$, 说明两个因素的交互作用对完成时有显著影响。

在尺寸为100px, 150px, 200px的3个水平下, 完成时平均值分别为4.60s, 4.46s, 4.38s, 可见在本实验取值范围内, 刺激元素的尺寸越大完成时越短, 在本实验中200px的尺寸水平带来最高的识别效率。不同尺寸水平的完成时箱线图如图4所示。

对于3个不同的间距水平, 如图5所示, 在间距为200px/400px和300px/600px的两个水平下, 随着尺寸增加, 完成时平均值呈下降趋势, 而在间距为400px/800px水平下, 尺寸为150px和200px水平的完成时平均值基本相等(4.34s和4.37s)。

2.5.2 失败次数统计分析

以尺寸和间距为因子, 对失败次数进行双因素ANOVA分析, 尺寸 $p=0.07 < 0.1$, 间距 $p=0.69 > 0.05$, 尺寸 \times 间距 $p=0.73 > 0.05$, 即刺激元

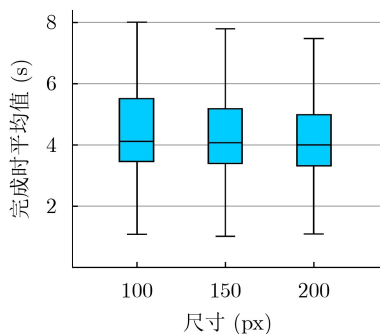


图4 不同尺寸水平的完成时箱线图

素尺寸对失败次数的影响边缘显著, 元素间距及两个因素的交互作用对失败次数无显著影响。在尺寸为100px, 150px, 200px的3个水平下, 总失败次数平均值为51次, 41.3次, 34.3次, 可见在本实验取值范围内, 刺激元素的尺寸越大失败次数越少。不同尺寸水平的失败次数箱线图如图6所示。

对于3个不同的间距水平, 如图7所示, 在间距为200px/400px和300px/600px的两个水平下, 随着尺寸增加, 每个水平的总失败次数呈下降趋势, 而在间距为400px/800px水平下, 尺寸为200px水平的总失败次数比150px水平有所回升。

3 用户主观评价

为了量化各个界面的用户体验, 本研究采用了ISO 9241可用性标准中对“满意度”的定义: 工作

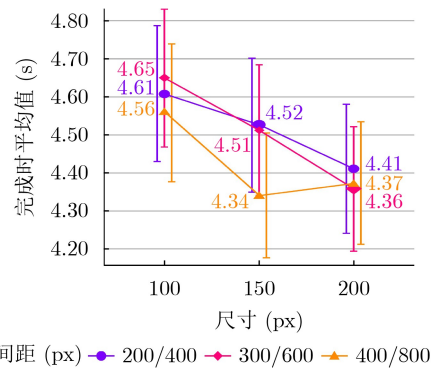


图5 不同尺寸水平的完成时平均值折线图

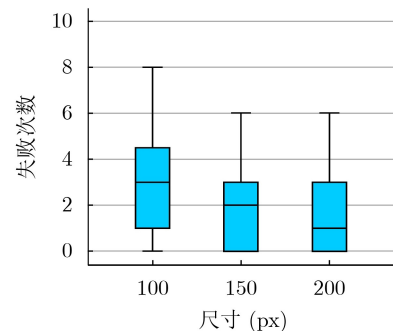


图6 不同尺寸水平的失败次数箱线图

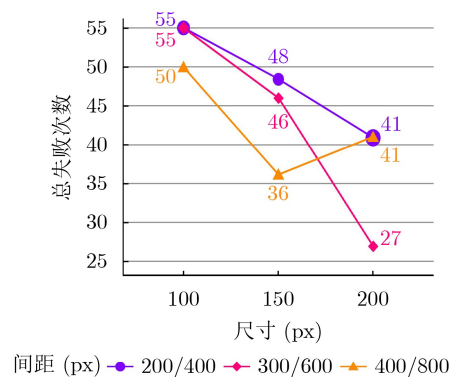


图7 不同尺寸水平的失败次数折线图

系统的用户和受其使用影响的人的舒适性和可接受度。舒适度和可接受度越高说明界面的用户满意度越高^[40]。做完实验后, 20名受试者被要求分别对9个界面(如图2)的舒适度和可接受度进行主观评价, 采用李克特7级量表评分, 即每份问卷18个问题, 共20份问卷, 360个问题, 对结果进行信度分析, 克龙巴赫 $\alpha=0.866$, 说明本问卷信度较高。

主观评价结果为: (1)尺寸100px下的200px/400px, 300px/600px, 400px/800px 3种间距的舒适度平均分分别为4.50, 5.45, 4.30, 可接受度平均分分别为4.35, 4.95, 4.55。(2)尺寸150px下的200px/400px, 300px/600px, 400px/800px 3种间距的舒适度平均分分别为3.55, 5.25, 4.50, 可接受度平均分分别为3.65, 5.30, 4.95。(3)尺寸200px下的200px/400px, 300px/600px, 400px/800px 3种间距的舒适度平均分分别为2.95, 4.50, 4.50, 可接受度平均分分别为3.00, 4.90, 4.95。

以尺寸、间距为因子分别对舒适度评分和可接受度评分进行重复测量方差分析。分析发现, 间距对舒适度评分有显著影响($p=0.00<0.05$), 对可接受度评分也有显著影响($p=0.001<0.05$); 尺寸对舒适度评分没有显著影响($p=0.11>0.05$), 对可接受度评分也没有显著影响($p=0.13>0.05$)。

如图8所示, 在尺寸为100px和150px的两个水平下, 随着间距增大, 舒适度评分先升高后下降, 间距为300px/600px时评分最高。而在尺寸为200px水平下, 400px/800px间距舒适度评分的平均分(4.50分)与300px/600px间距相等(4.50分)。

如图9所示, 在尺寸为100px和150px的两个水平下, 随着间距增大, 可接受度评分先升高后下降, 间距为300px/600px时评分最高。而在尺寸为200px水平下, 400px/800px间距可接受度评分的平均分(4.95分)与300px/600px间距基本相等(4.90分)。

间距对两个指标都有显著影响, 而尺寸没有,

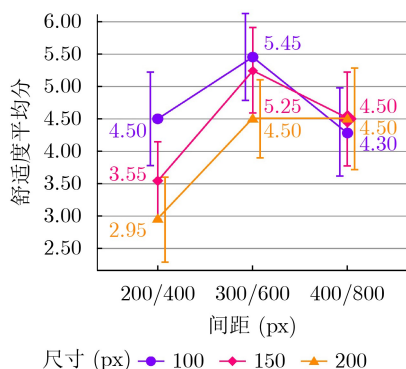


图8 不同间距水平的舒适度评价结果折线图

即实验因素(间距、尺寸)分别对主观评价的两个指标(舒适度、可接受度)的影响趋势是一致的。根据“满意度”的定义, 对舒适度和可接受度各赋50%权重, 计算最终的满意度得分。如图10所示, 在尺寸为100px和150px的两个水平下, 随着间距增大, 满意度先升高后下降, 间距为300px/600px时得分最高。而在尺寸为200px水平下, 400px/800px间距满意度得分(4.73分)与300px/600px间距基本相等(4.70分)。

4 讨论

本实验旨在探究基于SSVEP的BCI系统界面刺激元素尺寸和间距对识别效率及用户舒适度与可接受度的影响, 之前鲜有文献关注BCI界面的工效学研究。

本次实验的结果表明, 对于屏显刺激的方式, 刺激元素的尺寸大小对SSVEP的识别效率有显著影响, 且在本实验范围内尺寸越大效率越高, 与假设1以及Duszyk等人^[32]的研究结论相符。可能更大面积的光刺激会引发更明显的脑电反应, 此外根据瞿珏等人^[41]的研究, 在视觉搜索中交互项目面积增大能使受试者反应时间减小, 而本实验中的完成时记录了试次开始到识别成功的时间, 其中包含了受试者的视觉搜索阶段, 所以元素尺寸对BCI系统效率的增益可能与此有关。

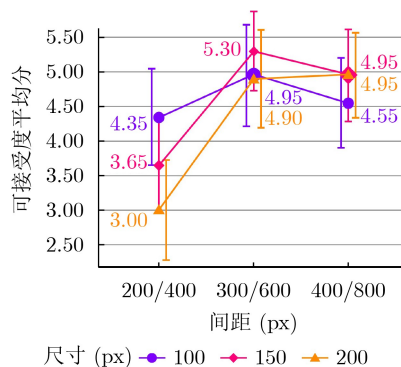


图9 不同间距水平的可接受度评价结果折线图

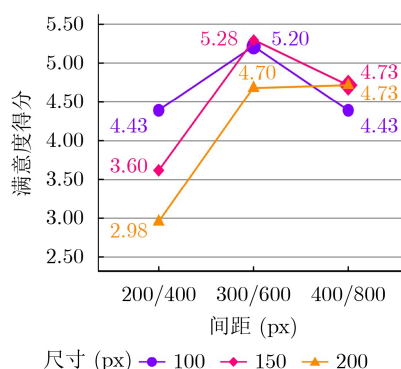


图10 不同间距水平的满意度得分折线图

识别效率整体随着尺寸增大呈增高的趋势,但在400px/800px间距水平下,200px的尺寸水平识别效率比150px较差,这与假设1有所不同,但此间距水平下200px尺寸的完成时平均值和失败次数没有高于其他间距水平的结果,没有影响整体趋势。大间距需要受试者进行头部运动以更好地完成注视,运动信号会干扰到SSVEP的识别,出现这个结果可能因为干扰放大了实验结果的随机性,仍可以从图5和图7看出150px和200px尺寸水平的实验结果显著好于100px尺寸水平。

与假设2以及Ravi等人^[31]的研究结论不同的是,元素间距对BCI识别效率并没有显著影响。在目标搜索过程中会发生凝视-扫视-凝视的浏览路径^[42],在本实验中,因为屏幕中心有箭头指向提示,且界面布局简单清晰、目标明显,可能因此导致受试者在大间距组别的扫视时间被元素间距的影响不显著。而小间距对于系统准确率也没有影响,根据目前的SSVEP键盘^[43]布局间距推测,这可能与本实验的界面中设置的最小元素间距仍不会对视觉产生强烈的干扰有关。

主观评价的结果表明,本次实验设置的最小元素间距对系统性能没有造成明显差异,但对用户满意度产生了负面影响,这说明视野中出现较为紧凑的不同功能键会让SSVEP-BCI使用者减少信心。而最大间距的满意度有所下降,这与假设3不同,可能因为更大的元素间距需要受试者耗费更多的体力(转动头部),才能完成视野中心的注视,尤其是在脑电实验的背景下,本实验使用的脑电帽采用有线连接,对头部运动有所牵制,导致受试者舒适度下降。

对于200px尺寸水平,最大间距没有导致用户满意度得分下降,这可能与边长为200px的刺激元素面积较大,在最大间距下界面布局比例和谐美观有关,大面积的刺激元素相较小面积刺激元素削弱了受试者对间距增大所增加的扫视负担的感知。

对于SSVEP-BCI的另外两种屏显刺激范式:简单闪烁刺激本质是明暗刺激(本文的实验范式)的一种特定情况,即明暗刺激的暗色与背景色相同;而图形模式反转刺激本质是集合了多个明暗刺激单元,同时通过反相,令各单元闪烁的明暗阶段不同,以达到使刺激频率比明暗刺激翻倍的效果。此两种范式的核心依然是明暗刺激,所以,对于明暗刺激元素的工效学研究结论是可以推广应用的。

5 结束语

本研究的结论为:(1)在本实验尺寸的取值范围内(100px,150px,200px),界面元素尺寸越

大,完成时越短,失败次数越少,系统识别效率越高,边长尺寸为200px的刺激元素识别效率最高。元素间距对识别效率没有影响。(2)元素间距对用户满意度有显著影响,刺激元素的紧凑(200px/400px)或疏远(400px/800px)都会导致满意度的下降,300px/600px的刺激元素间距设置带来相对更好的用户满意度,尺寸对用户满意度没有显著影响。这项研究的结论可以为SSVEP-BCI界面设计提供一定的参数设计依据,也有望向更具体的SSVEP-BCI应用程序或互动娱乐产品等形式推广。本研究存在一些局限,后续研究中可以尝试更多的刺激元素布局形式(例如矩阵)和元素形状(例如圆形);此外,有具体意义的操作任务需要被引入到下一步的实验中。

参考文献

- [1] 高上凯. 脑机接口的现状与未来[J]. 机器人产业, 2019(5): 38-44. doi: 10.3969/j.issn.2096-0182.2019.05.007.
GAO Shang-kai. Current situation and future of BCI[J]. *Robot Industry*, 2019(5): 38-44. doi: 10.3969/j.issn.2096-0182.2019.05.007.
- [2] LEE J, LEUNG V, LEE A H, et al. Neural recording and stimulation using wireless networks of microimplants[J]. *Nature Electronics*, 2021, 4(8): 604-614. doi: 10.1038/s41928-021-00631-8.
- [3] AFANASENKAU D, KALININA D, LYAKHOVETSKII V, et al. Rapid prototyping of soft bioelectronic implants for use as neuromuscular interfaces[J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2020, 4(10): 1010-1022. doi: 10.1038/s41551-020-00615-7.
- [4] SANI O G, ABBASPOURAZAD H, WONG Y T, et al. Modeling behaviorally relevant neural dynamics enabled by preferential subspace identification[J]. *Nature Neuroscience*, 2021, 24(1): 140-149. doi: 10.1038/s41593-020-00733-0.
- [5] 罗志增, 鲁先举, 周莹. 基于脑功能网络和样本熵的脑电信号特征提取[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(2): 412-418. doi: 10.11999/JEIT191015.
LUO Zhizeng, LU Xianju, and ZHOU Ying. EEG feature extraction based on brain function network and sample entropy[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(2): 412-418. doi: 10.11999/JEIT191015.
- [6] 徐宝国, 宋爱国, 费树岷. 在线脑机接口中脑电信号的特征提取与分类方法[J]. 电子学报, 2011, 39(5): 1025-1030.
XU Baoguo, SONG Aiguo, and FEI Shumin. Feature extraction and classification of EEG in online brain-computer interface[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(5): 1025-1030.
- [7] 吴明权, 李海峰, 马琳. 单通道脑电信号中眼电干扰的自动分离方法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(2): 367-372. doi: 10.11999/JEIT140602.
WU Mingquan, LI Haifeng, and MA Lin. Automatic

- electrooculogram separation method for single channel electroencephalogram signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(2): 367–372. doi: 10.11999/JEIT140602.
- [8] 高诺, 张慧, 高志栋, 等. 基于脑机接口技术的上下肢康复系统研究[J]. *生物医学工程研究*, 2021, 40(2): 166–171. doi: 10.19529/j.cnki.1672-6278.2021.02.11.
GAO Nuo, ZHANG Hui, GAO Zhidong, *et al.* Research on upper and lower limb rehabilitation system based on brain-computer interface technology[J]. *Journal of Biomedical Engineering Research*, 2021, 40(2): 166–171. doi: 10.19529/j.cnki.1672-6278.2021.02.11.
- [9] LI Hongqi, BI Luzheng, and YI Jingang. Sliding-mode nonlinear predictive control of brain-controlled mobile robots[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020: 1–3. doi: 10.1109/TCYB.2020.3031667.
- [10] WILLETT F R, AVANSINO D T, HOCHBERG L R, *et al.* High-performance brain-to-text communication via handwriting[J]. *Nature*, 2021, 593(7858): 249–254. doi: 10.1038/s41586-021-03506-2.
- [11] MOSES D A, METZGER S L, LIU J R, *et al.* Neuroprosthesis for decoding speech in a paralyzed person with anarthria[J]. *New England Journal of Medicine*, 2021, 385(3): 217–227. doi: 10.1056/NEJMoa2027540.
- [12] 杨俊, 马正敏, 沈韬, 等. 基于深度时空特征融合的多通道运动想象EEG解码方法[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(1): 196–203. doi: 10.11999/JEIT190300.
YANG Jun, MA Zhengmin, SHEN Tao, *et al.* Multichannel MI-EEG feature decoding based on deep learning[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(1): 196–203. doi: 10.11999/JEIT190300.
- [13] 徐光华, 张锋, 王晶, 等. 面向智能轮椅脑机导航的高频组合编码稳态视觉诱发电位技术研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(6): 21–29. doi: 10.3901/JME.2013.06.021.
XU Guanghua, ZHANG Feng, WANG Jing, *et al.* Research on key technology on time series combination coding-based high-frequency SSVEP in intelligent wheelchair BCI navigation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 21–29. doi: 10.3901/JME.2013.06.021.
- [14] 李佳宁, 蒲江波, 崔红岩, 等. 基于体感电刺激诱发P300的脑机接口[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(6): 1353–1360. doi: 10.19650/j.cnki.cjsi.2017.06.006.
LI Jianing, PU Jiangbo, CUI Hongyan, *et al.* Electrical somatosensory based P300 for a brain-computer interface system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(6): 1353–1360. doi: 10.19650/j.cnki.cjsi.2017.06.006.
- [15] 潘家辉. 基于P300和SSVEP的高性能脑机接口及其应用研究[D]. [博士学位论文], 华南理工大学, 2014.
PAN Jiahui. A study on P300 and SSVEP-based high-performance brain-computer interface and its application[D]. [Ph. D. dissertation], South China University of Technology, 2014.
- [16] YADAV D, YADAV S, and VEER K. A comprehensive assessment of Brain Computer Interfaces: Recent trends and challenges[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2020, 346: 108918. doi: 10.1016/j.jneumeth.2020.108918.
- [17] CECOTTI H. A self-paced and calibration-less SSVEP-based brain-computer interface speller[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2010, 18(2): 127–133. doi: 10.1109/TNSRE.2009.2039594.
- [18] WU Zhenghua, LAI Yongxiu, XIA Yang, *et al.* Stimulator selection in SSVEP-based BCI[J]. *Medical Engineering & Physics*, 2008, 30(8): 1079–1088. doi: 10.1016/j.medengphy.2008.01.004.
- [19] ZHU Danhua, BIEGER J, MOLINA G G, *et al.* A survey of stimulation methods used in SSVEP-based BCIs[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2010, 2010: 702357. doi: 10.1155/2010/702357.
- [20] LALOR E C, KELLY S P, FINUCANE C, *et al.* Steady-state VEP-based brain-computer interface control in an immersive 3D gaming environment[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2005, 2005(19): 706906. doi: 10.1155/ASP.2005.3156.
- [21] LBONNET. SSVEP: Steady-state visual-evoked potentials[EB/OL]. <http://openvibe.inria.fr/steady-state-visual-evoked-potentials>. 2021.
- [22] HWANG H J, LIM J H, JUNG Y J, *et al.* Development of an SSVEP-based BCI spelling system adopting a QWERTY-style LED keyboard[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2012, 208(1): 59–65. doi: 10.1016/j.jneumeth.2012.04.011.
- [23] LEGÉNY J, VICIANA-ABAD R, and LÉCUYER A. Toward contextual SSVEP-based BCI controller: Smart activation of stimuli and control weighting[J]. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 2013, 5(2): 111–116. doi: 10.1109/TCIAIG.2013.2252348.
- [24] MARTINEZ P, BAKARDJIAN H, and CICHOCKI A. Fully online multicommand brain-computer interface with visual neurofeedback using SSVEP paradigm[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2007, 2007: 094561. doi: 10.1155/2007/94561.
- [25] MAHMOOD M, MZURIKWAO D, KIM Y S, *et al.* Fully portable and wireless universal brain-machine interfaces enabled by flexible scalp electronics and deep learning algorithm[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2019, 1(9): 412–422. doi: 10.1038/s42256-019-0091-7.
- [26] 任泓锦, 张超, 伏云发. 影响单眼SSVEP控制的视力因素研究[J]. *四川师范大学学报:自然科学版*, 2021, 44(3): 419–426. doi: 10.3969/j.issn.1001-8395.2021.03.017.
REN Hongjin, ZHANG Chao, and FU Yunfa. Study on the factors influencing the visual control of single eye SSVEP cooperatively controlling[J]. *Journal of Sichuan Normal University: Natural Science*, 2021, 44(3): 419–426. doi: 10.3969/j.issn.1001-8395.2021.03.017.

- [27] 李鹏海, 许敏鹏, 万柏坤, 等. 视觉诱发电位脑-机接口实验范式研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(10): 2340–2351. doi: [10.19650/j.cnki.cjsi.2016.10.022](https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.2016.10.022).
LI Penghai, XU Minpeng, WAN Baikun, *et al.* Review of experimental paradigms in brain-computer interface based on visual evoked potential[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(10): 2340–2351. doi: [10.19650/j.cnki.cjsi.2016.10.022](https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.2016.10.022).
- [28] 陈景霞, 郝为, 张鹏伟, 等. RSVP与SSVEP混合脑电信号刺激与多类事件检测[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(15): 132–139. doi: [10.3778/j.issn.1002-8331.1905-0099](https://doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.1905-0099).
CHEN Jingxia, HAO Wei, ZHANG Pengwei, *et al.* RSVP & SSVEP hybrid EEG stimulation and multi-class event detection[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020, 56(15): 132–139. doi: [10.3778/j.issn.1002-8331.1905-0099](https://doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.1905-0099).
- [29] NIU Yafeng, ZUO Hongrui, YANG Xin, *et al.* Improving accuracy of gaze - control tools: Design recommendations for optimum position, sizes, and spacing of interactive objects[J]. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 2021, 31(3): 249–269. doi: [10.1002/hfm.20884](https://doi.org/10.1002/hfm.20884).
- [30] NG K B, BRADLEY A P, and CUNNINGTON R. Stimulus specificity of a steady-state visual-evoked potential-based brain-computer interface[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2012, 9(3): 036008. doi: [10.1088/1741-2560/9/3/036008](https://doi.org/10.1088/1741-2560/9/3/036008).
- [31] RAVI A, PEARCE S, ZHANG Xin, *et al.* User-specific channel selection method to improve SSVEP BCI decoding robustness against variable inter-stimulus distance[C]. 2019 9th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER), San Francisco, USA, 2019: 283–286.
- [32] DUSZYK A, BIERZYŃSKA M, RADZIKOWSKA Z, *et al.* Towards an optimization of stimulus parameters for brain-computer interfaces based on steady state visual evoked potentials[J]. *PLoS One*, 2014, 9(11): e112099. doi: [10.1371/journal.pone.0112099](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112099).
- [33] RENARD Y, LOTTE F, GIBERT G, *et al.* OpenViBE: An open-source software platform to design, test, and use brain-computer interfaces in real and virtual environments[J]. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2010, 19(1): 35–53. doi: [10.1162/pres.19.1.35](https://doi.org/10.1162/pres.19.1.35).
- [34] LI Xiaodong, WANG Xiaojun, WONG Chiman, *et al.* Influence of stimuli color combination on online SSVEP-based BCI performance[C]. 2019 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Virtual Environments for Measurement Systems and Applications, Tianjin, China, 2019: 1–5. doi: [10.1109/CIVEMSA45640.2019.9071623](https://doi.org/10.1109/CIVEMSA45640.2019.9071623).
- [35] ZHANG Yu, MA Hehe, JIN Jing, *et al.* Adaptive strategy for time window length in SSVEP-based brain-computer interface[C]. International Conference on Mechatronics & Control. Jinzhou, China, 2014: 140–143. doi: [10.1109/ICMC.2014.7231535](https://doi.org/10.1109/ICMC.2014.7231535).
- [36] BIN Guangyu, GAO Xiaorong, YAN Zheng, *et al.* An online multi-channel SSVEP-based brain-computer interface using a canonical correlation analysis method[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2009, 6(4): 046002. doi: [10.1088/1741-2560/6/4/046002](https://doi.org/10.1088/1741-2560/6/4/046002).
- [37] LYMEX. 人眼视觉特性(HVS)[EB/OL]. http://www.360doc.com/content/14/1126/14/20100466_428221946.shtml, 2021.
- [38] TROTT P, PEARCY M, RUSTON S, *et al.* Three-dimensional analysis of active cervical motion: the effect of age and gender[J]. *Clinical Biomechanics*, 1996, 11(4): 201–206. doi: [10.1016/0268-0033\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0268-0033(95)00072-0).
- [39] ZAMBALDE E P, JABLONSKI G, DE ALMEIDA M B, *et al.* Evaluation of the target positioning in a SSVEP-BCI[C]. XXVI Brazilian Congress on Biomedical Engineering, Armação de Buzios, Brazil, 2019: 581–587. doi: [10.1007/978-981-13-2517-5_88](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2517-5_88).
- [40] ISO. ISO 9241–210: 2010 Ergonomics of human-system interaction- Part 210: Human-centred design for interactive systems[S]. 2010.
- [41] 瞿珏, 朱帅, 王崴, 等. 自适应界面视觉搜索认知特性研究[J]. 电子学报, 2021, 49(2): 338–345. doi: [10.12263/DZXB.20190286](https://doi.org/10.12263/DZXB.20190286).
QU Jue, ZHU Shuai, WANG Wei, *et al.* Research on visual search cognitive characteristics of adaptive interface[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2021, 49(2): 338–345. doi: [10.12263/DZXB.20190286](https://doi.org/10.12263/DZXB.20190286).
- [42] 吴晓莉, 薛澄岐, GEDEON T, 等. 数字化监控任务界面中信息特征的视觉搜索实验[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2018, 48(5): 807–814. doi: [10.3969/j.issn.1001-0505.2018.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0505.2018.05.005).
WU Xiaoli, XUE Chengqi, GEDEON T, *et al.* Visual search on information features on digital task monitoring interface[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2018, 48(5): 807–814. doi: [10.3969/j.issn.1001-0505.2018.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0505.2018.05.005).
- [43] CHEN Yonghao, YANG Chen, YE Xiaochen, *et al.* Implementing a calibration-free SSVEP-based BCI system with 160 targets[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2021, 18(4): 046094. doi: [10.1088/1741-2552/ac0bfa](https://doi.org/10.1088/1741-2552/ac0bfa).

牛亚峰: 男, 1988年生, 博士, 副教授, 研究方向为先进人机交互、设计工效学等。

王佳浩: 男, 1997年生, 硕士生, 研究方向为脑机接口、工效学。

伍金春: 男, 1995年生, 博士生, 研究方向为神经设计学、人机交互。

薛澄岐: 男, 1961年生, 博士, 教授, 研究方向为先进人机交互、工效学评价等。

杨文骏: 男, 1987年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为人机交互。

责任编辑: 陈倩