

泛设计领域中的脑电研究现状与发展趋势

杨程¹, 彭怡腾², 唐智川³

(1.浙江大学城市学院, 杭州 310015; 2.浙江大学 计算机科学与技术学院,
杭州 310058; 3.浙江工业大学 设计与建筑学院, 杭州 310014)

摘要: **目的** 总结和梳理脑电技术在多个设计领域中的应用与研究现状, 归纳其研究范式, 探讨未来的发展趋势。**方法** 梳理国内外相关文献和研究案例, 对泛设计领域中的脑电研究进行分类总结。重点分析脑电在不同设计领域中的研究特点、脑电信号在不同设计情景下的表现特征以及脑机交互的应用。**结论** 脑电在产品设计、界面设计、广告设计、人机交互和设计思维认知中有广泛的研究和应用。为增加脑电研究的普适性与脑电应用的便易性, 需不断增强脑电的抗干扰性、实现非接触式采集以及完善脑认知的理论支撑。建立量化标准、多通道反馈机制和探索更多的应用场景是脑电在泛设计领域研究中的发展趋势。

关键词: 脑电; 事件相关电位; 神经设计学; 设计思维; 脑机交互

中图分类号: TB47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)16-0064-12

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.16.010

Research Status and Development Trend of EEG in Pan Design

YANG Cheng¹, PENG Yi-teng², TANG Zhi-chuan³

(1.City College, Zhejiang University, Hangzhou 310015, China;

2.School of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

3.School of Design and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

ABSTRACT: The paper aims to summarize and sort out the application and research status of EEG technology in many design fields, summarize its research paradigm, and explore its future development trend. Relevant literature and research cases at home and abroad were reviewed, and the EEG research in Pan design was classified and summarized. This paper focused on the research characteristics of EEG in different design fields, the performance characteristics of EEG signals in different design scenarios and the application of brain computer interaction. EEG is widely used in product design, interface design, advertisement design, human-computer interaction and design thinking cognition. To increase the universality of EEG research and the convenience of EEG application, it is necessary to enhance the anti-interference of EEG, realize non-contact acquisition and improve the theoretical support of brain cognition. The development trend of EEG in the field of Pan design is to establish quantitative standards, multi-channel feedback mechanism and explore more application scenarios.

KEY WORDS: EEG; event-related potential; neurodesign; design thinking; brain computer interaction

大脑皮层是具有运动、感觉、意识、情绪、语言、学习和记忆等功能的高级中枢, 分为额叶、顶叶、颞

叶和枕叶^[1]。在认知中, 枕、颞叶主要接受和整合来自客观环境的信息; 顶叶主要接受和整合来自躯体感

收稿日期: 2020-07-01

基金项目: 国家自然科学基金 (61702454); 浙江省自然科学基金 (LY18E050014)

作者简介: 杨程 (1978—), 男, 湖南人, 博士, 浙江大学城市学院教授, 主要研究方向为设计认知、计算机辅助产品设计、传统工艺保护与设计转化等。

通信作者: 彭怡腾 (1996—), 女, 浙江人, 浙江大学计算机科学与技术学院硕士生, 主攻设计认知和人机交互。

觉的信息; 额叶与其他皮层建立密切的交互联系, 在整合信息、推理、策划等大脑高级功能中起着至关重要的作用^[1]。随着科学技术的进步, 一系列脑成像技术得以开发, 用以研究大脑的结构, 探索大脑的功能, 例如脑电图 (Electroencephalogram, EEG)、功能性磁共振成像 (Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)、磁共振波谱 (Magnetic Resonance Spectroscopy, MRS)、近红外光学成像 (Near Infrared Optical Imaging)、正电子发射断层扫描 (Positron Emission Tomography, PET)、局部脑血流 (Regional Cerebral Blood Flow, rCBF)、结构磁共振成像 (Structural Magnetic Resonance Imaging, sMRI) 和弥散张量成像 (Diffusion Tensor Imaging, DTI) 等。其中, 脑电是一种使用电生理指标记录大脑活动的方法, 通过一组置于头皮的电极记录下脑细胞群的自发性、节律性电活动, 其记录结果呈现为随着时间变化的电极之间的电压差^[2]。相比于其他脑成像技术, 脑电具有极高的时间分辨率, 采集精度可达毫秒级, 空间分辨率随电极数量的增加不断提高, 非常适合实时采集设计师或用户在设计过程及产品使用过程中的脑反应信息。

脑电作为脑信号分析和应用技术, 已在心理学、认知科学、信息科学等学科中广泛应用。近年来, 随着技术的不断成熟和理论的逐渐完善, 脑电作为“认知工具”和“自然交互工具”在设计领域也掀起了研究热潮。本文主要介绍脑电在泛设计领域中的研究现状, 归纳相应的研究范式, 探讨其面临的挑战, 并预测其发展趋势。

1 介绍

1.1 泛设计领域与脑电研究

什么是设计? 这是一个十分宽泛的问题。Paul Rand 认为设计就是关系, 设计是内容和形式之间的关系^[3]。内容指想法或目标, 设计的内容可以是实体产品、电子界面, 也可以是一个事件的交互流程。形式是处理想法和实现目标的手段, 可以通过某种设计理论, 借助一项技术或基于某些设计软件来实现设计目标。总体而言, 设计是人的认知和创新活动, 而脑电可以反映大脑在这些活动中的变化。

根据不同的设计内容, 脑电可以介入产品设计、界面设计、广告设计、环境设计、人机工程和交互体验等多个领域的研究。从设计形式上来看, 不仅可以借助脑电技术来实现更便捷的人机交流, 而且可以通过脑电研究设计师在设计过程中的认知和思维。从设计流程上来看, 脑电可以参与设计前期对用户需求的的研究; 在设计构思过程中, 可以通过脑电研究设计师的思维过程; 在设计后期, 可以利用脑电进行设计评价和产品优化。综上, 本文从产品设计、界面设计、广告设计、神经人机工程、设计思维及脑机交互设计

等六个领域, 阐述脑电的研究现状。

1.2 脑电信号与认知

从人的大脑皮层上可以记录到两种脑电活动, 即自发性脑电和诱发性脑电 (Evoked Potentials, EP)。自发性脑电是大脑皮层自发产生的电位变化; 而诱发性脑电, 是施加一种特定的刺激, 作用于感觉系统或脑的某一部位, 在给予或撤销刺激时, 在脑区引起的脑电位变化^[4]。事件相关电位 (Event-related Potential, ERP) 是一种特殊的脑诱发电位, 通过赋予特殊心理意义的刺激产生的脑区电位^[4]。

EEG 具有五种频带, 可以反映人的不同精神状态。 δ 波 (0.5~4 Hz) 常在枕叶和额叶中被检测到, 一般在人处于疲劳或麻醉昏睡状态时出现。 θ 波 (4~8 Hz) 出现在人从平静放松状态转向睡眠状态时, 是中枢神经系统处于抑制状态时的主要波形。 α 波 (8~13 Hz) 是人在安静时的主要脑电波。 β 波 (13~30 Hz) 在中枢神经产生兴奋或紧张等强烈活动时出现, 大脑皮层越兴奋, β 波功率越大^[5]。 γ 波 (36~44 Hz) 在觉醒并专注于某一事物时出现。在一些研究中发现, α 和 β 波常作为用户情绪体验的指标^[6]。 α 与创造力和自上而下的处理紧密相关^[7], 根据额叶 α 波不对称性 (Frontal Alpha Asymmetry, FAA) 理论, α 波左前额叶的活跃度可作为愉悦或喜欢的指标^[8], 评估用户对产品、界面等的内隐感受。枕叶脑区产生的 β 与视力注意力的增加有关^[9]。 θ 活动则被认为与情节记忆、记忆负荷和工作记忆激活有关。

经典的 ERP 主要成分包括 P1、N1、P2、N2、P300、N400 等, 其中 P1、N1、P2 为外源性成分, N2、P300、N400 为内源性成分^[10]。P1、N1、P2 与视觉注意的早期加工有关^[11], N2 则揭示了大脑的初步加工过程, 与注意和刺激辨认相关, 代表了信息加工过程中的刺激分类阶段。P300 对于研究被试注意程度和心理负荷具有重要意义, 与注意、辨认、决策、记忆等重要认知功能相关, 反映大脑的资源分配情况, 靶刺激和标准刺激的差异可以诱发出 P300。N400 是研究大脑语言加工常用的 ERPs 成分, 可以反映语义认知加工过程, 也可以用于探测设计中意义不一致的情况, 如产品语义、图标语义的研究。晚期正成分 (Late Positive Potential, LPP) 与情感刺激的持续注意过程有关, LPP 振幅大小可以作为客观评价视觉对象外观吸引力的指标^[12]。

2 脑电在泛设计领域中的研究现状

2.1 产品设计中的脑电研究

脑电在产品设计中的研究主要涉及三个方面: 产品外观偏好、产品风格意象认知和用户体验研究。为获知用户对产品的看法, 现有的方法主要是通过调查

问卷、行为实验、里克特量表等心理学实验来了解,但这些方法受外界干扰较大,主观性较高。而脑电能以贴近认知本源的方式来展示用户的真实感受。

2.1.1 产品外观偏好

在研究用户对产品外观的偏好时,通常向用户呈现产品图像,要求其进行偏好选择,同时记录脑电信号。通过对脑电信号分析,了解用户在进行偏好选择时的大脑活动,进而开展设计评价或指导设计过程。郭伏等^[13]研究发现,用户面对不同造型的智能手机时,当产生使用意象时,能诱发较小波峰的 N2、P3 及较大波峰的 N3、LPP,脑地形图显示被试中顶区、顶区和枕区得到更强激活。Ding Yi 等^[14]将用户对智能手机进行偏好选择时的脑活动分为三个阶段:第一阶段的初步视觉感知体现在了 N2 上;第二阶段进行评估与调节,当出现预期图片时引发较小的 P300 和较大的 N300;最终形成认知,进行选择,引起较大的 LPP。王雪霜等^[15]和杨元等^[16]分别用 ERP 研究了用户对加湿器和办公椅的造型偏好选择时的脑认知过程。Chen 等^[17]研究了用户在挑选不同颜色的沙发时,颜色启示性和颜色吸引力的脑机制,并且发现产品的色彩吸引力与色彩亮度成正相关。邓丽等^[18]将脑电用于文创产品的开发,研究发现相较于不喜欢的图片,用户中央区域的 α 波在喜欢的图片刺激下平均功率显著提高,由此筛选出符合用户偏好的蜀文化图片,并进行了文创产品设计。与此同时,对汽车造型的研究也日益增多,王剑^[19]通过脑电筛选出符合大众审美的汽车整体和局部造型。张艳河等^[20]研究了不同档次的品牌标志对汽车造型脑电感知的影响。有些研究学者不再停留在产品认知阶段,他们基于研究结果开发出产品设计评价系统。唐帮备等^[21]提出了联合眼动和脑电信号的汽车造型评价模型,P300 在其中作为评价指标之一。Hsu^[22]通过研究用户在进行偏好选择时的专注度和情绪,构建了一套判断用户偏好的系统。

2.1.2 产品意象认知

产品意象是人对产品的感性认知,ERP 能够客观地反映用户对产品意象认知的内隐反馈。Lin 等^[23]将普通风格的桌子与具有明显设计风格的椅子进行匹配判断,发现引起了明显的 N400 波幅。陈默等^[24]研究了跑车的风格与意象词之间的匹配,发现跑车与“朴素”这一无关键词进行匹配判断时能在前部额叶脑区引起明显的 N400 波幅。胡玲玲^[25]研究发现,在进行产品意象推理的过程中,形状、颜色、材质与整体对产品意象认知的作用力大小为:颜色>形状>材质>整体。杨程等^[26]研究了吊灯意象匹配,并基于被试的反应时长、选择率和脑电信号等评价因素,构建了模糊推理的产品意象认知模型。

2.1.3 产品用户体验

产品偏好与产品意象的研究都是基于用户对产

品的外观感知,对产品的整体用户体验研究目前相对较少。Tomico 等^[27]研究了用户在与圆珠笔交互过程中的用户体验,用户在实验中完成一系列任务:感受外观(视觉刺激),操作圆珠笔(来自笔的触觉和视觉刺激),进行书写(来自笔的触觉和视觉刺激及来自写作的触觉和视觉反馈),脑电信号记录了整个过程中的愉悦、兴奋和舒适程度。Ding Yi 等^[28]利用脑电研究了两款智能手机的用户体验,被试需要使用智能手机完成在线购物、地图搜索、自拍等任务。研究发现在用户体验主观评价高的一组中,其 α 波、 θ 波和 γ 波更活跃,而 β 波和 θ 波的活跃度则更弱。

2.2 界面设计中的脑电研究

脑电在界面设计中的研究涉及三个方面:数字界面元素研究、界面布局研究和数字界面用户体验研究。

2.2.1 数字界面元素

数字界面元素的研究主要包括图标和文字,图标作为数字界面元素的重要组成部分,起着传达信息的作用。有大量的研究集中在图标的语义与认知效率上,研究结果被用来指导图标设计。宫勇等^[29]研究发现,与形象图标相比,语义匹配时抽象图标能引发更明显的 N400 成分,这表明抽象图标与所要传达信息的语义关系更弱。钱晓帆等^[30]基于识别电位(RP)研究了形象与抽象图标的早期识别进程,发现形象图标的 RP 波幅显著小于抽象图标,说明相比于抽象图标,形象图标在类别分拣进程中处理的特征信息量更少。任宏等^[31]研究了图标形象度对认知效率的影响,扁平化图标诱发的 P300 幅值大于拟物化图标,说明相对拟物化图标,扁平化图标会让用户投入更多的注意力并获得较高的认知效率。Niu Yafeng 等^[32]对图标认知负记忆荷进行了研究,实验要求被试在不同时间压力下识别不同数量的图标,研究发现 P300 和 P200 的幅度与任务难度成正比。易林楠^[33]基于 P300 的研究发现图标亮度对比高于 70% 时,图标识别性将达到较高水平,同时不再有显著提升。

2.2.2 数字界面布局

界面布局形式在很大程度上影响了用户搜索和获取信息的效率。牛亚峰等^[34]以两组不同相似度的音乐播放界面作为刺激材料,通过 Oddball 研究范式,发现两组刺激材料的靶刺激均能诱发出明显的 P300,其波幅与靶刺激和标准刺激的相似程度呈正相关,早期注意成分 N2b 的波幅与靶刺激和标准刺激的偏差程度呈正相关,验证了 P300、N2b 成分可以作为界面评估的有效成分。郭伏等^[35]对求职网站进行满意度评估,验证了 P2、N2 和 LPP 可以作为满意度评估的标志。Niu Yafeng 等^[36]研究了 Word 软件导航栏上的图标位置对认知效率的影响。Dong Yingying 等^[37]研究了网页 banner 上标志位置对品牌识别的影响,结果显示放置在左侧/右侧的标志可以产生比放置在中

间的标志更大的幅度的 P300, 这表明放置在左/右的标志比放置在中间的更具吸引力。Jens Bölte 等^[38]研究了设计专家与非专业人员进行网页美学评估时的脑认知特点。结果显示在网页刺激呈现的 110~130 ms, 符合审美的网页比不符合审美的网页引起的 EEG 幅度更大, 专家的脑电图振幅比非专业人员的大。复杂系统界面信息多且复杂, 以何种形式呈现对用户的认知效率有较大影响, Shao Jiang 等^[39]对监控界面的警报提示形式进行了研究, 结果发现改变提示信号颜色比改变其大小更能引起用户注意。在对界面色彩的研究中, 丁范卿^[40]研究了数字界面色彩编码对认知失误的影响, 脑电数据显示 P200 脑电成分的产生与色彩编码设计优劣具有显著相关性, 波幅越大, 色彩编码设计越趋于不合理, 越容易导致视觉认知失误。胡泽铭^[41]从色相、饱和度及明度三方面研究了音乐播放界面色彩配色对用户认知的影响。

2.2.3 用户体验

本节的用户体验指在网页、系统的交互过程中的完整体验, 包括易用性、愉悦度等问题。脑电在用户体验评估中的主要指标是代表用户情绪的 α 波。李森等^[42]研究了脑电、眼动技术融合的情感测量方法, 将 α 波幅值作为指标, 建立了网易网站购物查找任务的情感预测模型。陈波等^[43]对比了两个食材购买任务的交互流程, 提取了前额区 α 波的功率作为愉悦度指标, 研究发现影响体验的要素为交互流程中的可理解性、吸引力及操作步骤的数量。Hitoshi Masaki^[44]通过 EEG 定量研究两个版本的 Excel 软件的使用体验。Li Xiaowei 等^[45]研究了学生访问远程教育网站的用户体验。Victoria Meza-Kubo 等^[46]通过老年人在玩电脑小游戏过程中采集的脑电, 构建、训练并验证了用于识别愉悦和不愉快情绪的神经网络, 再以此网络来评估老年人使用应用程序时的用户体验。Christian Stickel 等^[47]研究了游戏软件的易学性。

2.3 广告设计中的脑电研究

针对平面广告的脑电研究主要集中在产品展示方式、信息呈现等方面。对视频广告的脑电研究主要集中在用户的愉悦度分析。

2.3.1 平面广告

毛岱泽^[48]研究了文案类型对 banner 广告点击率的影响, 结果表明被试在促销信息的文案刺激下的点击率显著增高, LPP 成分振幅也显著增高。Cheng Yang 等^[49]基于 ERP 研究了电商网站的 banner 类型对消费者购买意愿的影响。在产品广告展示图片的研究上, 韩伟伟等^[50]基于网络购物环境探测消费者对产品审美吸引力和性能的反应, 其研究发现当两者发生冲突时, 消费者更倾向于购买具有高审美吸引力的设计但性能较低的产品, 并验证了 N270 与冲突刺激有关, 研究结果可用于指导产品广告展示内容。

2.3.2 视频广告

脑电在视频广告的研究中, 关注被试在观看期间的注意力、记忆力、情感参与度等大脑活动。Giovanni Vecchiato 等^[51]基于 EEG 研究用户在观看电影中插入的广告时的愉悦性, 研究发现, 当观看到产生愉悦的广告时, 左额叶和前额叶的脑区被激活。Rafal Ohme 等^[52]基于额叶不对称性范式, 对比了两个版本的索尼广告 (其中一则加入了青蛙跳跃的片段), 发现有青蛙跳跃的那则广告激活了用户的左额叶区, 引起了强烈的积极情绪。Rafal Ohme^[53]在另一项研究中对比了两则护肤品广告, 发现有包含女模特摆出特定手势的那则广告更能增强广告效果。脑电视频广告的研究成果可以用于指导广告内容策划及广告视频剪辑。

2.4 神经人机工程学

“神经人机工程学”是对工作中的大脑和行为的研究, 它结合了神经科学和人体工程学^[54]。以往人机工程关注人的外在行为与工作环境的关系, 而脑电等脑成像技术能在认知层面了解人在操作环境中人机交互时的神经加工机制^[55]。神经人机工程学所涉及的情景是多种多样的, 如使用消费类产品、操作交通工具等生活和工作中的各种机器时的情景。基于脑电的神经人机工程学研究涉及来自体感触觉刺激的舒适性研究、来自视觉通道的工作界面研究以及一个特殊工作场景——驾驶情景研究。

2.4.1 舒适性研究

出于设计评价的目的, 研究者们利用脑电研究产品的舒适性高低, 其评价指标来自于体感触觉刺激下的脑电信号。邵婷婷等^[56]研究按摩位置与按摩舒适性、脑电变化规律之间的关系, 发现按摩舒适性与 θ 波呈正相关, 与 α 波呈负相关。陈浩森等^[57]研究了按摩模式对按摩椅按摩舒适性的影响, 得出了每个位置最合适的按摩模式 (按摩强度、靠背倾角), 并发现按摩期间 α 波能量均呈现下降趋势, θ 波能量均呈现递增趋势。刘运娟^[58]对服装压力舒适度进行了评估, 通过穿戴束身衣在不同姿势下的脑电数据测量结果来看, 塑形腹带产生的服装压力抑制了 α 波, 而且对比于站立时的 α 波功率, 静坐、伏案、弯腰时的 α 波受抑制程度更大。张晓夏等^[59]利用脑电进行丝织物的手感评估, 发现织物的柔软感、光滑感越强烈, α 波越活跃, β 波越抑制。

2.4.2 工作界面研究

视觉显示终端 (Visual Display Terminals, VDT) 的视觉显示界面已被广泛应用于各种工程设备中, 与传统的物理式信息界面相比, VDT 界面可以实现对多个显示界面的整合, 因此呈现的信息及其组织形式也更加复杂, 研究者们开始关注对 VDT 界面认识效率的研究。张宁宁^[51]研究了汽车仪表盘提示符号对驾

驶员认知负荷的影响。姜颖^[60]以不同色彩组合的航空仪表界面为测试对象建立了视觉舒适度的数学模型,视觉舒适度分别与顶叶 P4 处的 P300 幅值、 β 波能量及比值 $P(\alpha+\theta)/\beta$ 均显著相关。Yeh^[61]等研究了 VDT 界面上图标配色与曝光时间对注意力的影响。贾笑楠^[62]对飞行员头盔显示界面进行了研究,要求被试在操作界面进行飞行高度判断,研究发现, P300 的潜伏期与目标呈现效果呈正相关, P300 的波幅与目标呈现效果呈负相关。

2.4.3 驾驶情景

脑电在驾驶情景中的研究包含驾驶疲劳、精神负荷、驾驶情绪等涉及驾驶安全因素的研究。值得注意的是,研究实验基本都在模拟驾驶舱中进行,通常脑电会结合心率、呼吸、皮电等其他生理数据进行检测。王福旺等^[63]研究了长途客车驾驶员疲劳驾驶时的脑电特征,提取了 θ 、 β 波数据计算得到疲劳状态指标,即 δ 、 θ 波的能量和与 α 、 β 能量和的比值。王海玮等^[64]研究驾驶员在夜间环境中的精神负荷状态,通过 β 波功率谱值、脑电波 β/α 比值及 δ 波功率谱值来作为驾驶的紧张程度、判断和感知能力的准确性以及驾驶员精神疲劳程度的指标。宋国萍等^[65]研究了驾驶疲劳对视觉注意力的影响,要求工作 10 h 后的出租车司机进行视觉注意力实验,结果显示 P300 波幅显著降低, N2 幅值下降,即视觉注意力下降。钟铭恩等^[66]基于脑电对驾驶员情绪状态进行了识别,利用影音氛围诱发兴奋和悲伤两种情绪,发现额叶区诱发的 β 波受情绪状态影响显著。裴玉龙等^[67]研究了驾驶员年龄对疲劳度的影响,将 α 波、 β 波和 θ 波作为判断指标,结果显示老、中、青年驾驶员最优驾驶时间分别为 60~75 min, 120~135 min, 105~120 min。

2.5 脑电在设计思维中的研究

从认知的角度推进对设计的科学理解的研究一直在迅速发展,其核心是探究设计推理过程中如何调用信息来生成新的解决方案、判断和决策。设计思维被人们广泛接受的定义是来自设计咨询公司 IDEO 提出的一种创新方法论,即“用设计者的感知和方法去满足在技术和商业策略方面都可行的、能转换为顾客价值和市场机会的人类需求的规则^[68]”。本文提到的设计思维研究则是从认知角度探讨设计师在设计行为中的思维规律和推理规则^[69]及影响其思维过程的因素,其最终目的是指导设计创新和进行设计教育。脑电作为研究设计思维的方法之一,从脑电信号反映的生理基础逆向推导设计思维的运行机制。

2.5.1 设计思维过程推导

Nguyen 等^[70]利用脑电研究了设计师在进行设计活动中的认知过程。实验记录了设计师在平板电脑上进行室内布局设计的脑电数据,并将设计过程分解为二百六十个子设计片段,这些片段被标记为“问题分

析”、“方案生成”、“方案评估”和“方案表达”。他们认为一个完整的设计过程是由这四个子设计过程组合成的。通过计算子设计过程下的每个 EEG 频段 (δ 、 θ 、 α 和 β) 的功率密度谱发现,在 Fp1、Fp2 通道上, β 的功率在方案评估中很高,在方案表达中很低。Fp1、Fp2 通道位于的额叶脑区负责记忆检索、决策、计划、反应评估等,这证实被试在问题分析和方案评估中花费了大量的精力进行思考和判断。研究还发现与方案评估相比,解决方案生成方面需要较高的视觉思维能力。Nguyen 等^[71]研究了在概念设计过程中设计师的精神负荷和心理压力之间的联系。心理压力由心率变异性 (Heart Rate Variability, HRV) 来量化,精神负荷被认为是大脑对认知资源利用的体现,在设计中与创造力成正相关,通过 EEG 能量来量化。研究发现,在低中压力水平下的 θ 、 α 和 β 的能量显著高于高压下的。这表明,精神负荷在高水平心理压力下最低,而在中等压力和低压力之下较高。李梦蝶等^[72]对比被试在解决经典顿悟问题与设计问题中的脑活动,都得到了 γ 的 power 值上升的趋势,说明在设计问题的解决过程中大脑产生了类似的顿悟反应。

视觉意象的产生是设计过程中必不可少的一步, Esfahani 等^[73]将几何图形作为刺激材料,脑电图显示被试在视觉意象产生过程中右半球表现得更为活跃。Liang 等^[9]研究了视觉注意和视觉联想之间的关系,实验向被试呈现三种风格的油画,在被试思考油画有何视觉上的特点 (视觉注意) 时,脑电记录到 β 波在前额也被激活;在被试思考油画与设计项目有何关联 (视觉联想) 时, γ 波在额叶、中央、顶叶、颞叶和枕骨区域被激活,但三种风格的油画对视觉注意和联想没有显著影响。

2.5.2 影响因素

设计刺激以文字、音乐、图片等方式主动干预设计思维,从而影响设计创意的生成。Sun 等^[74]研究了文本提示对创意生成的影响,发现在有文本提示时,在中央脑区激发了更高的 θ 同步性,创意元素的数量相比于没有文本提示时更多,但质量却有所下降。有文本提示的创意生成过程会有更多结构化的思维过程,但创意生成需要更高的灵活性,文本的参与可能会导致较差的结果。Liang 等^[75]研究了音乐对设计思维的影响。在音乐刺激任务中,设计师的大脑激活主要在额中部和右侧颞部区域增加。不同的音乐风格可能会对设计师的思维产生不同的影响。袁萍等^[76]研究了不同距离的激励信息对产品设计思维的影响,将含有不同程度提示信息的图片作为刺激材料,要求被试进行自行车设计。研究发现激励信息越远, α 低波越活跃,说明随着信息激励距离越远,设计师对任务的认知逐渐增强。

经验对设计思维的影响是这一领域的研究重点

之一, 过往很多研究将被试划分为专家设计师和新手设计师, 作为对经验这一变量的控制。Yao 等^[77]研究了专家和新手设计师在从事视觉联想任务时的认知过程。研究发现专家设计师在前额叶皮层 α 波最活跃, 而新手的 α 波活跃脑区是中部和右侧的额-顶-颞叶皮层。专家同时使用两边脑半球和执行功能来支持其联想任务, 而新手则主要使用其右半球和记忆检索功能。Liu 等^[78]研究不同诗词对专家和新手视觉设计师设计思维的影响。Sun 等^[74]研究通过草图表达创意的设计过程中, 专家设计师和新手设计师产生的创意元素数量虽然没有显著差异, 但在质量上, 专家设计师高于新手设计师。

2.6 脑机交互设计

脑机接口 (Brain-Computer Interface, BCI) 是一种实现人脑和计算机或其他设备之间通信的系统, 脑机交互设计是基于 BCI 系统的应用设计。前面五个领域的脑电研究主要集中在人的认知研究层面, 而基于脑机接口系统的人机交互设计则更偏向应用层面。脑机交互设计按目标用户来分可分为医疗领域和非医疗领域。脑机接口的初衷是帮助有严重运动障碍的人建立与外界的全新交互通道, 早期脑机交互的设计主要集中在医疗领域, 随着脑机接口的发展, 面向大众的脑机交互设计也逐渐增多。

2.6.1 医疗领域中的脑机交互设计

在医疗领域的脑机交互设计主要面向患有肌萎缩侧索硬化 (Amyotrophic Lateral Sclerosis, ALS)、脑中风、脑瘫、脊髓损伤等疾病的患者^[79]。这部分人群几乎丧失了移动能力及与外界进行交流的能力, 脑机接口能帮助他们重新与外界进行交互。尽管这种交互是有限的, 但对他们来说意义重大。现有的脑机交互设计主要帮助他们恢复或重新建立三个能力: 沟通交流的能力、运动能力及对环境控制的能力。

为了让患者表达其所想, 最早在 1988 年, Farwoll 等^[80]用 P300 实现了拼写系统。之后专家们进行了大量基于脑电接口的拼写系统的设计研究。Han-Jeong Hwang 等^[81]利用不同闪烁频率的 LED 诱发的稳态视觉电位 (SSVEP) 设计了一款脑电键盘, 其键盘字母的排布等同于常规的 “QWERT” 键盘排布。考虑到许多患者是后天失去交流能力, 常规键盘的排布相比于其他研究中的矩阵排布可能对患者来说更熟悉。他们利用这款键盘进行了拼写实验, 拼写一个字符所需的时间设置为 6s, 其中一名被试拼写六十八个字符的准确率达到了 100%。

要让运动障碍患者重新获得运动能力有两种途径, 一种是依赖轮椅来实现, 另一种是通过外接设备来实现, 例如以外骨骼来控制四肢。脑机接口在轮椅设计中的主要目标是实现患者对轮椅的自主控制。2005 年 Kazuo Tanaka 等^[82]首次基于 EEG 实现了轮椅

的向左或向右的控制。在之后的研究中发现, 脑控轮椅对患者的精神负荷过大, 针对这一问题, 张瑞^[83]将自动驾驶技术与脑控轮椅结合, 脑机接口只用于轮椅启动前的目的地选择和轮椅停止的命令发送, 路径规划则由导航系统来完成, 从而极大地减少了患者的精神负担。轮椅只能代替行走, 而外骨骼能帮助患者实现更加自主的运动。2014 年的巴西足球世界杯由一位身穿脑控外骨骼的截瘫青年完成了开球。唐智川等^[84]基于卷积神经网络将运动想象电位进行分类, 被试通过想象左手运动或脚运动来驱动上肢外骨骼, 带动右手完成相应的动作。卫兵等^[85]提出了一种基于稳态视觉诱发脑电 (SSVEP) 的控制方法, 提取出刺激器的闪烁频率, 进而转换成相应的控制命令控制机械臂。对于一些瘫痪或偏瘫的患者来说, 恢复运动能力具有较大的可能性, BCI 系统能帮助他们更好地恢复。Gert Pfurtscheller 等^[86]通过运动想象电位控制置于瘫痪患者手臂表面的功能电刺激 (Functional Electrical Stimulation, FES) 设备, 电极施加脉冲刺激激活瘫痪肌肉, 由此病人能用瘫痪的手对圆柱体进行抓握。Lauren Souders 等^[87]设计了一款家用 BCI 外骨骼, 研究此系统对中风后运动障碍患者运动恢复和神经可塑性的影响, 发现在患者在家使用十二周后, 行动研究组测试 (Action Research Arm Test, ARAT) 平均增加 6.2 点, 这一结果证明了 BCI 系统对运动恢复的有效性。

随着智能家电的兴起, 患者对生活环境的控制也得到了增强。已有研究通过运动想象电位或稳态视觉电位实现对台灯、电风扇的控制^[88-89]。

2.6.2 非医疗领域中的脑机交互设计

早期的脑机交互应用主要集中在医疗领域, 随着 BCI 系统性能的提升, 为健康大众设计的 BCI 应用也逐渐发展起来。BCI 系统带来了新的交互方式, 并能给用户的状态监测带来更高效的反馈, 由此增强用户体验。非医疗目的的脑机交互设计主要涉及游戏交互、计算机辅助设计、疲劳驾驶场景和儿童教育场景等。

BCI 创建的新颖交互方式极大地增加了游戏的挑战性与吸引力, Laurent Bonnet 等^[90]基于运动想象电位设计了一款双人踢球游戏, 玩家通过想象左 (或右) 手的运动将球推向左 (或右) 的球门。这款游戏还涉及竞争模式和协作模式, 拓宽了多人脑机交互设计的通道。VR 游戏是近年来的设计热点, 脑机交互的介入能在现有手柄交互、手势交互的基础上丰富交互方式, 提升游戏体验。同时, 虚拟现实环境带来的沉浸式体验也能为 BCI 系统带来更好的反馈, 从而优化系统。Lalor 等^[91]设计了一款基于 SSVEP 的 VR 游戏, 玩家通过注视左右两边的闪烁方格来控制虚拟人物的平衡。

鼠标和键盘是传统计算机辅助设计 (CAD) 系统的交互方式, 而 CAD 普遍具有复杂的操作命令, 为

提高设计效率,类似手绘板、语音输入等交互方式也逐渐兴起。Esfahani 等^[73]希望能利用设计师的大脑活动来直接创造和编辑几何图形,他们将立方体等基础几何图形作为视觉刺激材料,对引起的脑电信号进行分类,平均准确率约为 44.6%,研究证明 BCI 在 CAD 系统中创建几何形状方面具有广阔的前景。Niu 等^[92]通过“放大”图标的刺激所引发的脑电信号来控制界面的放大,有效地实现了数字界面图标的脑机控制。S. Sree Shankar 等^[93]通过 BCI 系统在 Google SketchUp 上执行拉伸扫描等命令完成了复杂几何的 3D 建模。

由于脑电信号可以反映用户注意力、精神负荷等的精神状态,BCI 系统在儿童教育与驾驶情景上也有较多的应用。儿童教育领域的脑机交互设计主要涉及学习状态监测、个性化教学及注意力训练。Sun 等^[94]在利用脑电耳机监测学习者学习时的注意力,在其注意力水平较低时提供音频反馈来激发学习者的自我调节能力。这种负反馈机制同样可以被应用在线上教学系统中,以督促学生的自我控制。目前有研究团队开发出基于 BCI 的认知风格识别系统,学生的认知风格被分为视觉型、听觉型、读写型和操作型,基于此,老师可以给予个性化的分层教学^[95]。注意力训练系统在治疗儿童注意缺陷多动障碍(ADHD)上有相对广泛的应用,医院采用脑电生物反馈治疗手段,训练强化患者的 SMR 波,抑制 θ 波。在训练过程中,通过与患者互动,利用其自身调节来强化对大脑有利的波形,改善脑功能失调的状况。虽然市面上也存在家用的注意力训练脑电仪以及脑电玩具来辅助儿童的注意力训练,但其存在缺点,即价格过于昂贵。驾驶场景的注意力监测也是脑机交互的研究热点之一,Nataliya Kosmyna 等^[96]开发的脑电眼镜通过监测 EEG 节律波($\alpha+\theta$)/ β 指数和 EOG 眨眼次数来判断驾驶员的疲劳程度与警惕性,再通过骨传导来进行听觉反馈,以及震动模块进行触觉反馈,从而提醒驾驶员。

3 脑电在泛设计领域中的研究范式

脑电在泛设计领域中的研究流程主要分为:脑电信号采集、信号预处理、特征提取、数据分析。基于不同的研究目的,在信号采集阶段会采用相应的实验范式,从而采集到对应的脑电信号。而后对脑电信号进行预处理,其目的是去除采集过程中受到噪声信号干扰而产生的伪迹,包括眼电纠正、滤波等步骤。特征提取是将原始脑电信号变换成任务相关的特征,例如属于时域特征的 ERP 及属于频域特征的节律波。在数据分析阶段多用到方差分析来研究各因素之间对实验结果的影响。

在信号采集阶段的实验步骤会涉及刺激呈现和行为操作,不同的刺激呈现方式和行为构成了不同的实验范式。Oddball 范式属于经典的 ERP 实验范式,

常用于研究视觉注意。在对界面布局、图标的研究中常用到 Oddball 范式,它将刺激分为“标准刺激”与“靶刺激”^[5],在实验序列中靶刺激为所要研究的界面或图标,其出现概率一般小于 30%,被试需要在靶刺激出现的时候进行按键反应。启动范式是语义研究的主要范式,能够考察长时记忆中的稳定知识表征。经典的启动范式先后呈现启动刺激(如一个单词)和目标刺激(一个字符串),被试需要在目标刺激出现时尽快判断两者是否是同一个词^[97],当出现歧义时会出现明显的 N400。在产品意象匹配、图标语义匹配的研究中也会用到启动范式,实验序列先后呈现产品图片和意象词或者图标和语义词,被试需要快速判断两者是否匹配。Sternberg 研究范式是工作记忆研究的常用范式,在界面和人机工程中用以研究认知负荷。首先呈现一组刺激序列,如一组图标,在刺激序列消失后出现一个或多个探测刺激,要求被试判断探测刺激是否在先前的刺激序列中出现过^[98]。偏好研究范式常用于产品造型、界面布局、广告设计、舒适性研究中,刺激图片材料等概率呈现,被试在刺激出现时进行按键偏好反应:是否喜欢、是否购买、是否舒适等。上述实验范式多用于产品设计、界面设计、广告设计、神经人机工程中的研究,在设计思维研究中没有固定的研究范式,通常根据当前研究课题进行实验设计,在被试进行设计活动或思考设计方案时进行脑电信号的采集,刺激的形式也比较多样化,如文本、音乐、图画等。

脑机交互设计的流程在脑电信号采集、信号预处理、特征提取的基础上多了信号分类、信号控制的步骤。通过机器学习等方法对提取的特征进行分类识别,以得到的分类结果来实现对系统、硬件的控制。在脑机交互设计中信号采集过程没有固定的实验范式,不同的控制信号要求的刺激呈现方式也不同。基于运动想象电位的控制信号,在采集过程中刺激呈现可能是不同方向的箭头。基于稳态视觉电位的控制信号需要通过闪烁刺激来获取,闪烁编码的方式也各有不同。

4 脑电在泛设计领域中的挑战与发展趋势

4.1 面临的挑战

脑电实验成本高,难度大。一方面,脑电实验准备步骤繁琐,被试需要洗头以清除油渍,再进行数十甚至数百个电极贴片的脑电膏涂抹。实验开始前需进行 30~60 min 的准备工作。这增加了实验招募被试的难度及实验的时间成本,导致脑电实验的被试人数偏少。另一方面,脑电实验对实验环境的要求较高,需要非常安静的实验环境,并远离电动设备、电辐射源等,避免外界声、光、电对脑信号的干扰^[99]。实验时,要求被试保持头部静止和注意力集中。由于脑电信号

微弱, 计量单位为百万分之一伏特, 容易受外界干扰。这导致许多脑电实验很难在真实环境中进行, 且一般实验任务较为简单, 实验素材以图片、文字等为主。较少的样本数量和较为单一的实验素材, 影响研究结果的普适性。因此, 脑电硬件的发展是脑电研究的重要挑战之一。

泛设计领域中的脑电研究仍缺乏完备的理论支撑。人的认知过程是极其复杂的过程, 是大脑各区域间相互作用的结果。认知神经科学还处于探索期, 脑电研究所基于的理论本身也需要发展。更多的研究是对某些认知假设进行验证。泛设计中的脑电研究和认知神经科学需要相互验证和相互促进。

目前, 脑电研究的成果落地性不高, 商业推广难度大。在硬件方面, 大型的脑电仪难以走出实验室, 更多地应用在理论研究层面。现有的应用主要通过较为轻便的脑电耳机实现, 这类可穿戴式的脑电仪通过干电极来采集信号, 相对于研究用脑电仪(湿电极)提高了便易性。然而作为可穿戴设备, 脑电耳机仍不够人性化。在算法方面, 脑电应用设备的稳定性还不够高, 采集自极少数人的脑电数据训练出的算法在其他用户身上的分类准确率可能会降低, 来自同一个人的数据训练出的算法随着时间的推移, 其分类准确率也可能会降低^[73]。

4.2 发展趋势

建立量化标准。通过脑电信号来量化神经机制是脑电研究的趋势之一。专家学者们不再停留在特定脑区的“激活”和“失活”的研究上, 脑电信号功率与大脑活动的正负相关性也不再满足研究需求。大量的研究开始利用数学方法基于脑电建立量化模型。杨程等^[26]通过模糊数学的方法建立了吊灯产品意象推理模型。Hsu^[22]利用偏最小二乘法比较产品外观偏好预测模型中各因素的相关性。通过脑电信号来量化神经机制是脑电应用的基础, 建立量化标准能推动脑电技术在设计领域的落地性。

发展“脑电技术+”, 建立多通道的输入反馈机制。随着技术的发展, 脑电技术研究不再是一座孤岛, 与其他技术相结合能纵向加深、横向拓宽脑电研究的深度与广度。一方面可以与其他生物监测技术相融合, 如眼动^[21,42,96,100]、心率^[71]等, 达到多指标检测以提高准确性, 联合 fMRI 技术进行研究可以很好地弥补脑电空间分辨率不高的问题。另一方面可以与 VR、AR 等技术相结合, 获得更好的输入反馈机制, 模拟真实环境的沉浸式体验可以弥补脑电研究环境受限的问题。另外, 人工智能的发展提高了脑电信号的分类准确率, 拓宽了脑电技术的应用场景。

扩宽非侵入式脑机接口技术在非医疗领域的应用场景。医疗领域的脑机交互设计已有较为深入的研究, 而为健康的人服务的脑机交互设计近年来刚刚兴起, 例如在游戏设计、计算机辅助设计、儿童教育等

领域中的脑机交互。脑机接口所带来的全新交互方式, 在自然交互等非医疗领域属于起步阶段, 其应用场景可以有广阔的探索。

5 结语

通过梳理和总结脑电技术应用在设计领域的各种可能性, 为研究人员、设计师和开发人员等提供了有益的参考。作为一项前沿技术, 脑电技术和脑机交互设备的广泛应用将大力推动设计领域的发展。相关研究需要结合脑电技术的特性, 正视脑电技术现有的限制, 设计恰当的实验范式, 更好地发挥其在以人为本的设计中的作用。同时, 需要拓宽脑电技术在设计领域的应用边界, 从技术本身的优化、新技术的结合、新情景的探索等角度发现更多的可能性。

参考文献:

- [1] 孙久荣. 脑科学导论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001. SUN Jiu-rong. An Introduction to Brain Science[M]. Beijing: Peking University Press, 2001.
- [2] ARDEN R, CHAVEZ R S, GRAZIOPLANE R, et al. Neuroimaging Creativity: A Psychometric View[J]. Behavioural Brain Research, 2010(214):143-156.
- [3] 迈克尔·克罗格. 设计是什么: 保罗·兰德给年轻人的一堂课[M]. 北京: 世界图书出版公司, 2017. KROEGER M. Paul Rand: Conversations with Students[M]. Beijing: World Publishing Corporation, 2017.
- [4] 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, 2010. WEI Jing-han, LUO Yue-jia. Principle and Technique of Event-related Brain Potentials[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [5] 蔡船, 邓丽, 陈波, 等. 脑电技术在工业设计中的应用[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(10): 80-84. CAI Chuan, DENG Li, CHEN Bo, et al. Application of EEG Technology in Industrial Design[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(10): 80-84.
- [6] 葛燕, 陈亚楠, 刘艳芳, 等. 电生理测量在用户体验中的应用[J]. 心理科学进展, 2014, 22(6): 959-967. GE Yan, CHEN Ya-nan, LIU Yan-fang, et al. Electrophysiological Measures Applied in User Experience Studies[J]. Advances in Psychological Science, 2014, 22(6): 959-967.
- [7] FINK A, BENEDEK M. EEG Alpha Power and Creative Ideation[J]. Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 2014 (44): 111-123
- [8] BRIESEMEISTER B B, TAMM S, HEINE A, et al. Approach the good, Approach the Good, Withdraw from the Bad—A Review on Frontal Alpha Asymmetry Measures in Applied Psychological Research[J]. Psychology, 2013, 4(3): 247-265.
- [9] LIANG C, LIN C, CHANG W, et al. Visual Attention and Association: An Electroencephalography Study in Expert Designers[J]. Design Studies, 2017(48): 76-95.

- [10] STEVEN J. An Introduction to the Event-related Potential Technique[M]. Cambridge: A Bradford Book, 2005.
- [11] 罗跃嘉, 魏景汉. 注意的认知神经科学研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
LUO Yue-jia, WEI Jing-han. Attentive Research and Cognitive Neuroscience[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [12] NITTONO H. Late Positive Potentials Associated with the Attractiveness of the Appearances of Commercial Goods[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2013(124): 35.
- [13] 郭伏, 丁一, 张雪峰, 姜均译, 等. 产品造型对用户使用意向影响的事件相关电位研究[J]. *管理科学*, 2015, 28(6): 95-104.
GUO Fu, DING Yi, ZHANG Xue-feng, JIANG Jun-yi, et al. The Impact of Product Forms on User's Usage Intention with Event Related Potentials[J]. *Journal of Management Science*, 2015, 28(6): 95-104.
- [14] Ding Y, Guo F, Zhang X, et al. Using Event Related Potentials to Identify a User's Behavioural Intention Aroused by Product form Design[J]. *Applied Ergonomics*, 2016(55): 117-123.
- [15] 王雪霜, 郭伏, 刘玮琳, 等. 基于事件相关电位的产品外观情感测量研究[J]. *人类工效学*, 2018, 24(1): 20-26.
WANG Xue-shuang, GUO Fu, LIU Wei-lin, et al. Affective Measurement of Product Appearance by ERPs[J]. *Chinese Journal of Ergonomics*, 2018, 24(1): 20-26.
- [16] 杨元, 刘文金, 李国华. 用户对家具产品不同偏好的脑认知探微[J]. *林业工程学报*, 2019, 4(5): 152-158.
YANG Yuan, LIU Wen-jin, LI Guo-hua. Research on Users' Cognition of Different Preferences Based on ERPs[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2019, 4(5): 152-158.
- [17] CHEN M, FADEL G, XUE C, et al. Evaluating the Cognitive Process of Color Affordance and Attractiveness Based on the ERP[J]. *International Journal on Interactive Design & Manufacturing*, 2015(11): 471-479.
- [18] 邓丽, 陈波, 庞茜月, 等. 脑电技术在文化创意产品情感化设计中的应用[J]. *图学学报*, 2018, 39(2): 327-332.
DENG Li, CHEN Bo, PANG Qian-yue, et al. Application of EEG Technology in Emotional Design of Cultural and Creative Products[J]. *Journal of Graphics*, 2018, 39(2): 327-332.
- [19] 王剑. 基于认知脑电的汽车造型评价研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
WANG Jian. Research of the Automobile Modeling Evaluations Based on Cognition Electroencephalogram[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009.
- [20] 张艳河. 基于脑电的用户感知意象思维表征[J]. *机械设计*, 2017, 34(6): 113-118.
ZHANG Yan-he. User Thinking Representation of Product Image Based on ERPs[J]. *Journal of Machine Design*, 2017, 34(6): 113-118.
- [21] 唐帮备, 郭钢, 王凯, 等. 联合眼动和脑电的汽车工业设计用户体验评选[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(6): 1449-1459.
TANG Bang-bei, GUO Gang, WANG Kai, et al. User Experience Evaluation and Selection of Automobile Industry Design with Eye Movement and Electroencephalogram[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(6): 1449-1459.
- [22] HSU W. An Integrated-mental Brainwave System for Analyses and Judgments of Consumer Preference[J]. *Telematics and Informatics*, 2017(34): 518-526.
- [23] LIN Ming-huang, WANG Ching-yi, CHENG Shih-kuen, CHENG Shih-hung. An Event-related Potential Study of Semantic Style-match Judgments of Artistic Furniture[J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2011(82): 188-195.
- [24] 陈默, 王海燕, 薛澄岐, 等. 基于事件相关电位的产品意象-语义匹配评估[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(1): 58-62.
CHEN Mo, WANG Hai-yan, XUE Cheng-qi, et al. Match Judgments of Semantic Word-Product Image Based on Event-Related Potential[J]. *Journal Of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2014, 44(1): 58-62.
- [25] 胡玲玲. 基于认知脑电的产品意象的视觉相似性推理[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
HU Ling-ling. Visual Similarity Reasoning of Product Image Based on Cognition Electroencephalogram[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [26] 杨程, 陈辰, 唐智川. 基于脑电的产品意象推理模型研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(23): 126-136.
YANG Cheng, CHEN Chen, TANG Zhi-chuan. Study of Electroencephalography Cognitive Model of Product Image[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(23): 126-136.
- [27] TOMICO O, MIZUTANI N, LEVY P, et al. Kansei Physiological Measurements and Constructivist Psychological Explorations for Approaching User Subjective Experience[C]. Dubrovnik: 10th International Design Conference, 2008.
- [28] DING Y, CAO Y, QU Q, et al. An Exploratory Study Using Electroencephalography(EEG) to Measure the Smartphone User Experience in the Short Term[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2020(36): 1008-1021.
- [29] 宫勇, 杨颖, 张三元, 等. 具体性对图标理解影响的事件相关电位研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2013, 47(6): 1000-1005.
GONG Yong, YANG Ying, ZHANG San-yuan, et al. Event-related Potential Study on Concreteness Effects to Icon Comprehension[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2013, 47(6): 1000-1005.
- [30] 钱晓帆, 杨颖, 孙守迁. 图标形象度影响早期识别进程:来自 ERP 的证据[J]. *心理科学*, 2014, 37(1): 27-33.
QIAN Xiao-fan, YANG Ying, SUN Shou-qian. Exploring the Effects of Icon Concreteness on the Recognition Process: An Event - Related Potential Study[J]. *Journal of Psychological Science*, 2014, 37(1): 27-33.
- [31] 任宏, 邹媛媛, 王丹丹, 等. 基于 ERP 的扁平化与拟物化图标认知效率研究[J]. *包装工程*, 2018, 39(18): 186-190.
REN Hong, ZOU Yuan-yuan, WANG Dan-dan, et al. Cognitive Efficiency of Flat and Skeuomorphic Icons

- Based on ERP[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(18): 186-190.
- [32] NIU Y, XUE C, LI X, et al. Icon Memory Research under Different Time Pressures and Icon Quantities Based on Event-related Potential[J]. *Journal of Southeast University(English Edition)*, 2014, 30(1): 45-50.
- [33] 易林楠. 基于ERP的图标亮度对比对图标可识别性的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
YI Lin-nan. The Study of Icon Identifiability Influenced by Icon Luminance Contrast Based on ERP[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [34] 牛亚峰, 薛澄岐, 彭宇玥, 等. 基于 ERP 技术的数字界面布局认知与评估[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(3): 470-475.
NIU Ya-feng, XUE Cheng-qi, PENG Ning-yue, et al. Cognition and Evaluation of Digital Interface Layouts Based on Event-related Potential Technique[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2016, 46(3): 470-475.
- [35] 郭伏, 刘玮琳, 王雪霜, 等. 网页界面满意度评估的事件相关电位研究[J]. *工业工程与管理*, 2016, 21(3): 126-131
GUO Fu, LIU Wei-lin, WANG Xue-shuang, et al. Event-Related Potential Study on Webpages Satisfaction Evaluation[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2016, 21(3): 126-131.
- [36] NIU Y, XUE C, WANG H, et al. Event-Related Potential Study on Visual Selective Attention to Icon Navigation Bar of Digital Interface[C]. Toronto: Springer, 2016.
- [37] DONG Y, XUE C, PENG N, et al. The Effect of LOGO Location in Navigation Bar on Web Brand Recognition Based on Event-Related Potential[C]. Hohhot: Springer, 2018.
- [38] BÖLTE J, HÖSKER T M, HIRSCHFELD G, THIELSCH M T. Electrophysiological Correlates of Aesthetic Processing of Webpages: A Comparison of Experts and Laypersons[J]. *PeerJ*, 2017(5): 3440.
- [39] SHAO J, XUE C, WANG H, et al. Study on Event-Related Potential of Information Alarm in Monitoring Interface[C]. Heraklion: Springer, 2015.
- [40] 丁范卿. 数字界面视觉信息认知失误的生理实验方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
DING Fan-qing. The Physiological Experiment Method For Visual Cognitive Error of Interactive System[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [41] 胡泽铭. 数字界面视觉信息认知 ERP 实验研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
HU Ze-ming. Research on Visual Information Cognition of Digital Interface Based on ERP Experiment[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [42] 李森, 庄晓旭, 刘玮琳, 等. 脑电、眼动技术融合的情感测量方法研究[J]. *工业工程与管理*, 2014, 19(6): 144-148.
LI Sen, ZHUANG Xiao-xu, LIU Wei-lin, et al. Research of an Emotional Measuring Method Based on EEG and Eye Movement Technology[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2014, 19(6): 144-148.
- [43] 陈波, 邓丽, 蔡船, 等. 基于情绪脑电的交互原型方案评价研究[J]. *包装工程*, 2017, 38(10): 110-114.
CHEN Bo, DENG Li, CAI Chuan, et al. Evaluation Interactive Prototype Scheme Based on Emotional EEG[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(10): 110-114.
- [44] MASAKI H, OHIRA M, UWANO H, et al. A Quantitative Evaluation on the Software Use Experience with Electroencephalogram[C]. Berlin: Springer, 2011.
- [45] LI X, HU B, ZHU T, YAN J, ZHENG F. Towards Affective Learning with an EEG Feedback Approach[C]. Beijing: ACM, 2009.
- [46] MEZA-KUBO V, MORAN A L, CARRILLO I, et al. Assessing the User Experience of Older Adults Using a Neural Network Trained to Recognize Emotions from Brain Signals[J]. *Journal of Biomedical Informatics*, 2016(62): 202-209.
- [47] STICKEL C, FINK J, HOLZINGER A. Enhancing Universal Access – EEG Based Learnability Assessment[C]. Berlin: Springer, 2007.
- [48] 毛岱泽. 文案类型对 banner 广告点击率与情感反馈的影响——基于事件相关电位的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
MAO Dai-ze. The Effect of Advertising Copy on Click Rate and Emotional Feedback: Based on ERP Research of Neural Mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [49] YANG C, WANG Q, MAO D, ZENG J, WANG Y. The Effects of Different E-commerce Advertising Copies on Young Users' Cognition and Purchase Intention: An ERP Study[C]. Copenhagen: Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology, 2020(126): 122.
- [50] 韩伟伟, 王晶. 产品设计与性能冲突对消费者决策过程的神经学影响[J]. *南开管理评论*, 2017, 20(2): 155-168.
HAN Wei-wei, WANG Jing. Neurological Impact of the Conflict between Product Design and Performance on Consumer Decision Process[J]. *Nankai Business Review*, 2017, 20(2): 155-168.
- [51] VECCHIATO G, TOPPI J, ASTOLFI L, et al. Spectral EEG Frontal Asymmetries Correlate with the Experienced Pleasantness of TV Commercial Advertisements[J]. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 2011(49): 579-583.
- [52] OHME R, MATUKIN M, SZCZURKO T. Neurophysiology Uncovers Secrets of TV Commercials[J]. *Der Market*, 2010(49): 133-142.
- [53] OHME R, REYKOWSKA D, WIENER D, CHOROMANSKA A. Analysis of Neurophysiological Reactions to Advertising Stimuli by Means of EEG and Galvanic Skin Response Measures[J]. *Journal of Neuroscience, Psychology, and Economics*, 2009(2): 21-31.
- [54] 张宁宁. 基于神经人因学的人-车交互系统若干问题的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
ZHANG Ning-ning. Research on Several Issues in Human-Vehicle Interaction System Based on Neuroergonomics[D]. Shenyang: Northeast University, 2012.
- [55] 许为, 葛列众. 人因学发展的新取向[J]. *心理科学进展*, 2018, 26(9): 1521-1534.
XU Wei, GE Lie-zhong. New Trends in Human Fac-

- tors[J]. *Advances in Psychological Science*, 2018, 26(9): 1521-1534.
- [56] 邵婷婷, 申黎明. 基于脑电(EEG)的椅式按摩位置对按摩舒适性影响的研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2014, 41(2): 338-341.
- SHAO Ting-ting, SHEN Li-ming. EEG-based Evaluation of Chair Massage Points on Comfortableness in a Massage[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2014, 41(2): 338-341.
- [57] 陈浩森, 申黎明, 宋杰, 等. 按摩模式对揉捏式按摩椅按摩舒适性的影响[J]. *人类工效学*, 2012, 18(2): 40-43.
- CHEN Hao-miao, SHEN Li-ming, SONG Jie, et al. Influence of Massage Pattern on Kneading Massage Chair Comfort[J]. *Chinese Journal of Ergonomics*, 2012, 18(2): 40-43.
- [58] 刘运娟. 基于脑电技术的服装压力舒适性评价方法的基础研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- LIU Yun-juan. Basic Research on Clothing Pressure Comfort Evaluation Method Based on Based on EEG Technology[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [59] 张晓夏. 基于神经生理学的丝织物手感知机理研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
- ZHANG Xiao-xia. Study on the Mechanism Between Neurophysiology and Silk Handle[D]. Suzhou: Suzhou University, 2015.
- [60] 姜颖, 洪军, 王巍, 等. 面向 VDT 显示界面的视觉舒适度客观描述方法[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(1): 77-83.
- JIANG Ying, HONG Jun, WANG Wei, et al. An Objective Description Method of Visual Comfort for VDT Display Interface[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2017, 48(1): 77-83.
- [61] YEH Y, LEE D, KO Y. Color Combination and Exposure Time on Legibility and EEG Response of Icon Presented on Visual Display Terminal[J]. *Displays*, 2013(34): 33-38.
- [62] 贾笑楠. 基于 ERP 的头盔显示界面符号编码研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- JIA Xiao-nan. The Symbolology Research of Helmet-Mounted Display Based on ERP[D]. Nanjing: Northeast University, 2017.
- [63] 王福旺, 王宏. 长途客车驾驶员疲劳状态脑电特征分析[J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(5): 1146-1152.
- WANG Fu-wang, WANG Hong. EEG Characteristic Analysis of Coach Bus Drivers in Fatigue State[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(5): 1146-1152.
- [64] 王海玮, 温惠英, 刘敏. 夜间环境驾驶员精神负荷的生理特性评估与实验[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2017, 47(2): 420-428.
- WANG Hai-wei, WEN Hui-ying, LIU Min. Experimental Evaluation of Nighttime Driver's Physiological Characteristics in Driving Simulator[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(2): 420-428.
- [65] 宋国萍, 张侃. 驾驶疲劳对视觉注意影响的 ERP 研究[J]. *心理科学*, 2010, 33(5): 1067-1069.
- SONG Guo-ping, Zhang Kan. An ERP Study of Effects of Driving Fatigue on Visual Attention[J]. *Psychological Science*, 2010, 33(5): 1067-1069.
- [66] 钟铭恩, 吴平东, 彭军强, 等. 基于脑电信号的驾驶员情绪状态识别研究[J]. *中国安全科学学报*, 2011, 21(9): 64-69.
- ZHONG Ming-en, WU Ping-dong, PENG Jun-qiang. Study on an Emotional State Recognition Technology Based on Drivers' EEGs. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(9): 64-69.
- [67] 裴玉龙, 金英群, 陈贺飞. 基于脑电信号分析的不同年龄驾驶人疲劳特性[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(4): 59-65.
- PEI Yu-long, JIN Ying-qun, CHEN He-fei. Fatigue Characteristics in Drivers of Different Ages Based on Analysis of EEG[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(4): 59-65.
- [68] BROWN T. Design Thinking[J]. *Harvard Business Review*, 2008, 86(6): 84-92.
- [69] 尹碧菊, 李彦, 熊艳, 等. 设计思维研究现状及发展趋势[J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(6): 1165-1176.
- YIN Bi-ju, LI Yan, XIONG Yan, et al. Current Research Situation and Development Tendency of Design Thinking[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(6): 1165-1176.
- [70] NGUYEN T A, ZENG Y. Analysis of Design Activities Using EEG Signals[C]. Montreal: ASME, 2011.
- [71] NGUYEN T A, ZENG Y. A Physiological Study of Relationship Between Designer's Mental Effort and Mental Stress During Conceptual Design[J]. *Computer-Aided Design*, 2014(54): 3-18.
- [72] 李梦蝶, 熊艳, 李彦, 等. 基于 EEG 探索刺激条件下设计中的顿悟现象[J]. *机械*, 2019, 46(1): 1-6.
- LI Meng-die, XIONG Yan, LI Yan, et al. EEG Study of Insight in Stimulated Design Problem Solving[J]. *Machinery*, 2019, 46(1): 1-6.
- [73] ESFAHANI E T, SUNDARARAJAN V. Classification of Primitive Shapes Using Brain-Computer Interfaces[J]. *Computer-Aided Design*, 2011, 44(10): 1011-1019.
- [74] SUN L, XIANG W, CHAI C, et al. Impact of Text on Idea Generation: An Electroencephalography Study[J]. *International Journal of Technology and Design Education*, 2013(23): 1047-1062.
- [75] LIANG Chao-yun, LIU Yu-Cheng. Effect of Musical Stimuli on Design Thinking: Differences between Expert and Student Designers[J]. *Cogent Psychology*, 2018, 5(1): 1-16.
- [76] 袁萍, 熊艳, 李彦, 等. 基于 EEG α 波活动探究信息激励距离对产品设计思维的影响[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(15): 40-48.
- YUAN Ping, XIONG Yan, LI Yan, et al. An Exploration into the Influence of Stimulation Distance of Stimulus Information on Design Thinking Based on EEG Alpha Activity[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(15): 40-48.
- [77] YAO Shu-Nung, LIN Chin-Teng, KING Jung-Tai, et al. Learning in the Visual Association of Novice and Expert Designers[J]. *Cognitive Systems Research*, 2017(43): 1-10.

- 76-88.
- [78] LIU Yu-Cheng, CHANG Chi-Cheng, YANG Yu-Hsuan Sylvia, et al. Spontaneous Analogising Caused by Text Stimuli in Design Thinking: Differences between Higher- and Lower-creativity Groups[J]. *Cognitive Neurodynamics*, 2018(12): 55-71.
- [79] WOLPAW J R. Brain-computer Interfaces(BCIs) for Communication and Control: A Mini-review. Supplements to Clinical Neurophysiology[J]. *Communications of the ACM*, 2004(57): 607-613.
- [80] FARWELL L A, DONCHIN E. Talking off the Top of Your Head: Toward a Mental Prosthesis Utilizing Event-related Brain Potentials[J]. *Electroencephalography Clinical Neurophysiology*, 1988, 70(6): 510-23.
- [81] HWANG H, LIM J, JUNG Y, et al. Development of an SSVEP-based BCI Spelling System Adopting a QWERTY-style LED Keyboard[J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2012(208): 59-65.
- [82] TANAKA K, MATSUNAGA K, WANG H O. Electroencephalogram-based Control of an Electric Wheelchair[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(4): 762-766.
- [83] 张瑞. 面向重度残疾人的脑机接口功能辅助研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- ZHANG Rui. A Study on Brain Computer Interface (BCI)-based Functional Assistance for the Seriously Disabled[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [84] 唐智川, 张克俊, 李超, 等. 基于深度卷积神经网络的运动想象分类及其在脑控外骨骼中的应用[J]. *计算机学报*, 2017, 40(6): 1367-1378.
- TANG Zhi-Chuan, ZHANG Ke-Jun, LI Chao, et al. Motor Imagery Classification Based on Deep Convolutional Neural Network and Its Application in Exoskeleton Controlled by EEG[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2017, 40(6): 1367-1378.
- [85] 卫兵, 吴小培, 吕钊. 基于诱发脑电的人机交互系统的设计与实现[J]. *工业控制计算机*, 2009, 22(2): 25-26.
- WEI Bing, WU Xiao-pei, LYU Zhao. Design and Implementation of HCI System Based on VEP[J]. *Industrial Control Computer*, 2009, 22(2): 25-26.
- [86] PFURTSCHELLER G, MULLER G R, PFURTSCHELLER J, et al. "Thought" - Control of Functional Electrical Stimulation to Restore Hand Grasp in a Patient with Tetraplegia[J]. *Neuroscience Letters*, 2003(351): 33-36.
- [87] SOUDERS L, SHEEHAN L. Demonstrating the Therapeutic Potential of Contralesional BCI Control for Motor Recovery in Chronic Stroke[J]. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2019, 100(10): 61.
- [88] 赵丽, 邢潇, 郭旭宏, 等. 基于稳态视觉诱发电位的脑-机接口无线智能家居系统研究[J]. *生物医学工程学杂志*, 2014, 31(5): 967-970.
- ZHAO Li, XING Xiao, GUO Xu-hong, et al. A Wireless Smart Home System Based on Brain-computer Interface of Steady State Visual Evoked Potential[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2014, 31(5): 967-970.
- [89] 范恩胜, 鲁守银, 朱青, 等. 基于运动想象的脑机接口智能家居系统研究[J]. *建筑电气*, 2018, 37(2): 51-54.
- FAN En-sheng, LU Shou-yin, ZHU Qing, et al. Study on BCI Smart House System Based on Motor Imagination[J]. *Building Electricity*, 2018, 37(2): 51-54.
- [90] BONNET L, LOTTE F, LECUYER A. Two Brains, One Game: Design and Evaluation of a Multi-User BCI Video Game Based on Motor Imagery[J]. *IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI in Games*, 2013, 5(2): 185-198.
- [91] LALOR E, KELLY S P, FINUCANE C, et al. Steady-State VEP-Based Brain-Computer Interface Control in an Immersive 3D Gaming Environment[J]. *URASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2005(19): 3156-3164.
- [92] NIU Y, XUE C, WANG H, et al. Digital Interface Brain Computer Interaction Method Based on Icon Control[C]. Vancouver: Springer, 2017.
- [93] SHANKAR S S, RAI R. Human Factors Study on the Usage of BCI Headset for 3D CAD Modeling[J]. *Computer-Aided Design*, 2014(54): 51-55.
- [94] SUN C, YE P. The Effects of Attention Monitoring with EEG Biofeedback on University Students' Attention and Self-Efficacy: The Case of Anti-Phishing Instructional Materials[J]. *Computers & Education*, 2017(106): 73-82.
- [95] 柯清超, 王朋利. 脑机接口技术教育应用的研究进展[J]. *中国电化教育*, 2019(10): 14-22.
- KE Qing-chao, WANG Peng-li. Research Progress on the Application of Brain-computer Interface Technology in Education[J]. *China Educational Technology*, 2019(10): 14-22.
- [96] KOSMYNA N, MORRIS C, NGUYEN T, ZEPF S, HERNANDEZ J, MAES P. AttentivU: Designing EEG and EOG Compatible Glasses for Physiological Sensing and Feedback in the Car[C]. Tianjin: Springer, 2019.
- [97] 杨亚平. 启动测量范式的理论蕴含及其在心理学研究中的应用[J]. *西北师大学报(社会科学版)*, 2012, 49(3): 31-36.
- YANG Ya-ping. Theories and Applications of Priming Paradigm in Psychological Studies[J]. *Journal of Northwest Normal University (Social Sciences)*, 2012, 49(3): 31-36.
- [98] 魏景汉, 阎克乐. 认知神经科学基础[M]. 北京: 人民教育出版社, 2008.
- WEI Jing-han, YAN Ke-le. Fundamentals of Cognitive Neuroscience[M]. Beijing: People's Education Press, 2008.
- [99] 赵仑. ERPs 实验教程[M]. 南京: 东南大学出版社, 2010.
- ZHAO Lun. Experimental Course of ERPs[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2010.
- [100] 夏敏燕. 产品意象评价中的眼动与脑电技术研究进展[J/OL]. *包装工程*: 1-6[2020-05-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1094.TB.20200313.1649.025.html>.
- XIA Min-yan. Research Progress of Eye Movement and EEG Technology in Product Image Semantics Evaluation[J/OL]. *Packaging Engineering*: 1-6[2020-05-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1094.TB.20200313.1649.025.html>.