

【工业设计】

神经美学在用户研究领域的研究现状及展望

梁晨, 孙元

(大连理工大学 建筑与艺术学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: **目的** 探索神经美学研究中用户的情感认知与脑活动规律、脑电成分间的关联, 对非侵入性测量方法的3个主要研究方向进行分类梳理及总结, 提出神经美学在用户研究领域发展的3个方向。**方法** 从当下量化美学的需求出发, 阐述神经美学的产生发展、相关概念、研究方法; 从审美偏好、意象认知、用户体验3个方向, 交叉对比现有国内外学者的研究, 对神经美学在用户研究领域的应用进行分类讨论; 对神经美学的理论研究和应用实例文献进行讨论, 提出了实验设计可行性、数据采集精准度、研究方法普适性3个维度中可能存在的问题。**结论** 神经美学的产生发展是美学与实证科学并行、融合的结果, 在用户情感需求的驱动下, 促进效能提升、优化美学计算、扩展应用范围将成为神经美学在用户研究领域的重要研究方向。

关键词: 神经美学; 脑电技术; 意象认知; 用户体验; 审美偏好

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)16-0076-16

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.16.008

Research Status and Prospects of Neuroaesthetics in the Field of User Research

LIANG Chen, SUN Yuan

(College of Architecture and Art, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

ABSTRACT: This research aims to explore the relationship between users' emotional cognition, brain activity patterns, EEG components in neuroaesthetics research, and three main research directions of needle invasive measurement methods are sorted out and summarized and three directions for the development of neuroaesthetics in the field of user research are proposed. First, proceeding from the current needs of quantitative aesthetics, the generation and development, related concepts, and research methods of neuro-aesthetics are elucidated. Furthermore, from the three directions of aesthetic preference, image cognition, and user experience, the existing researches of domestic and foreign scholars are cross-compared, and the application of neuroaesthetics in the field of user research is classified and discussed. Finally, the theoretical research and application examples of neuroaesthetics are discussed, and possible problems in the three dimensions of experimental design feasibility, data collection accuracy, and universality of research methods are raised. The generation and development of neuroaesthetics is the outcome of the parallel and integration of aesthetics and empirical science. Driven by the emotional needs of users, such methods as promoting efficiency enhancement, optimizing aesthetic calculations, and expanding the scope of application will become an important research direction of neuroaesthetics in the field of user research.

KEY WORDS: neuroaesthetics; EEG technology; image cognition; user experience; aesthetic preference

21世纪——情感化设计时代的到来, 使“满足用户的需求”成为设计的重要目的, 传统设计流程的弊端, 也随着用户需求从生理到心理的转变逐渐暴露出来, 用户希望在使用、体验产品的过程中得到更高

收稿日期: 2022-03-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775079); 教育部人文社科基金项目(18YJC760073); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT21RW211)

作者简介: 梁晨(1996—), 女, 硕士生, 主攻工业设计、神经美学。

通信作者: 孙元(1978—), 男, 副教授, 主要研究方向为感性工学、神经美学。

的情绪价值, 用户基于高情绪价值也将对产品产生更包容的心理, 于是如何使自己的产品能够诱发积极的情绪反应, 成为各个企业试图解决的核心问题^[1]。美国著名认知心理学家唐纳德·诺曼在其著作《情感化设计》一书中提出一件产品成功与否, 设计的情感要素也许比实用要素更为关键^[2]。然而, 人类的情感复杂、多变, 如何准确、有效地捕捉用户情感成为当下亟待解决的问题。

审美始于视知觉, 终于情感辨析, 二者均是依赖大脑内神经结构有序进行的生理活动。美学和科学因其对人类社会的贡献不同, 似乎相差甚远。随着科学技术的发展, 为挖掘大脑结构与艺术感知之间的关联, 探索人类审美、认知等心理活动的脑神经作用机制, 以及采用科学方式量化美的主观感受, 一个新的学科——神经美学应运而生, 近年来神经美学也逐渐成为了自然科学与人文社会科学的交叉点^[3], 国内外学者对二者的共通性进行了深入探索, 目前已取得了丰硕的成果。本文针对神经美学展开文献综述研究, 重点从审美偏好、意象认知、用户体验 3 个方向, 对其在用户研究领域的应用进行分析总结, 并结合神经美学的关键技术阐述其需要面对的 3 个挑战: 实验设计可行性、数据采集精准度、研究成果应用方向。最后, 从量化指标、效能提升、应用范围 3 个方面, 对神经美学的发展动向进行展望。

1 神经美学相关理论阐述

1.1 产生发展

“美”是一种主观感受, 迄今为止, 在单纯的美学范畴内, 无论大众或是艺术家们对美感问题的权衡判断仍然处于探索阶段。康德 (Immanuel Kant) 是德国古典美学的奠基人, 他在美学领域的探索以“主体”为出发点, 并完全站在审美的角度上展开, 康德指出: 只有主观的思维才能决定事物的基础, 这样的判断是审美判断, 而不是逻辑判断^[4]。换言之, 审美判断不是经验判断, 也不是知识判断, 更不是道德判断, 而是一种绝对主观, 并具有普适必然性的判断。继康德对审美活动作出总结之后, 更多的艺术家、哲学家试图从主体的视角去思考美学问题的本源, 进而衍生出以“知觉”为核心概念的格式塔心理学美学^[5]、逻辑出口联通科学美学的认识论美学、与医学领域协同发展的精神分析美学等, 这些美学流派都不同于以往形而上的探索途径, 着重从心理学的角度, 突破传统本体论美学范畴的框架。自 20 世纪 90 年代起, 认知神经科学, 亦称脑科学的蓬勃发展将实证方法带入美学问题的研究中, 神经美学就此诞生^[6]。如图 1 所示, 神经美学的发展历史反映了心理学、神经科学、进化生物学和哲学美学研究的发展和融合, 它的出现是社会进步的必然结果。

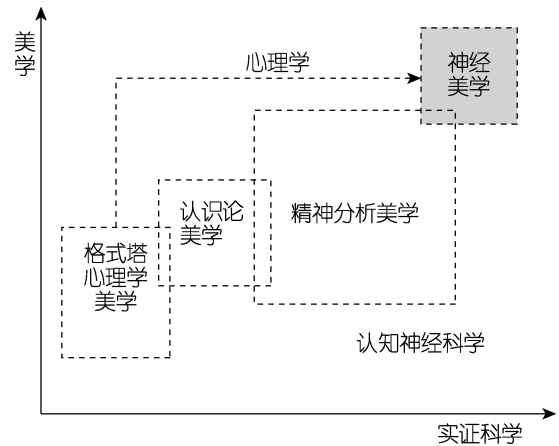


图 1 美学学科发展关系

Fig.1 Relationship between Aesthetics

我国对神经美学的研究倾向于探寻认知的过程及作用机理, 也称作“认知美学”。西方的研究进展基本与我国同步, 最初着重于通过解剖的手段寻找参与审美判断的脑部神经结构。审美活动是大脑中枢系统与认知过程及机理共同作用的结果, 因此, 随着中西方在神经美学领域研究的边界逐渐消解, 我国的“认知美学”也更名为“认知神经美学”, 以促进国内外在神经美学领域的研究交流。

1999 年发表的《内在视觉—探索艺术与大脑》(“Inner Vision: An Exploration of Art and the Brain”)一书开辟了神经美学的研究道路, 这一著作中首次使用了“神经美学 (neuro-aesthetics)”这一概念, 并系统地尝试从神经学的角度去诠释视觉艺术, 其作者塞米尔·泽基 (Semir Zeki) 也被誉为“世界上首位精通神经中枢作用机制, 又擅长将它运用于理解艺术中的人”^[7]。泽基教授提及: 大脑和艺术的功能是统一的, 二者均通过表征常量来获取信息和知识。书中通过分析经典绘画艺术作品中的神经学作用机制, 以及病理学、哲学问题, 非常乐观地认为: 随着对大脑的了解更加充分, 人们将从基本的视觉功能起, 逐步发展成一个完整的神经生物学艺术理论^[8]。

心理学在这个发展过程中扮演了至关重要的角色, 得益于技术的驱动, 其中格式塔心理学派为多维认知转化研究提供了大量的概念模型和理论框架, 例如 Su 基于格式塔图像的审美体验, 通过对汉诗英译本的认知处理, 挖掘了“意象-审美”概念的心理体验^[9]; Leder 等提出了一种审美鉴赏和判断模型, 旨在对艺术审美过程中的心理变化进行综合描述, 为现代艺术的创新性、个性化及其能够激发多样化审美体验的特性提供了合理解释^[10]。这些从心理学角度解释美学理论的研究产生了一个共识, 即审美是知觉、认知和情感过程之间的复杂互动, 且大脑中并不存在处理艺术的独立局部位置, 所谓的艺术体验源于广泛分布的皮质与皮质下大脑区域网络节点之间的相互作用, 这一结论也为审美的神经生物学解释指明了方向。

1.2 审美认知相关的脑结构

欧洲的生物学家们早在 19 世纪便发现大脑不同功能区域控制着身体的特定行为, 审美认知活动依赖于大脑神经机制得以实现。每个参与审美体验的认知过程都与几个潜在的大脑区域和神经结构相关^[11]。自文艺复兴起, 已经过了漫长的几个世纪, 人类脑结构的变化微乎其微, 可见艺术远高于视觉器官的感知, 由于受到语言、知识、意识形态等众多因素的影响, 个体之间必定存在审美差异, 这些差异也必然会在大脑上留下印记, 因此, 若没有生物学基础, 则美学理论将是不完整的。

大脑是人体最高级的信息中枢(如图 2 所示), 其 4 个主要功能区分别为顶叶、枕叶、颞叶和额叶^[12]。在认知的过程中, 顶叶位于大脑半球的后顶部, 负责接收来自躯体的触觉信息, 并对不同类型的感觉信息进行整合; 枕叶位于大脑半球的后部, 含有专门负责处理和解读视觉信息的区域; 颞叶位于大脑半球的两侧, 负责接收来自客观环境的刺激信息, 外侧具有专门负责言语理解的区域, 内侧的海马体是形成记忆的关键; 额叶位于大脑半球的前部, 与其他组织结构间存在密切的联系, 在整合信息、推理、决策、计划与执行等人脑的高级功能中起着至关重要的作用^[13]。

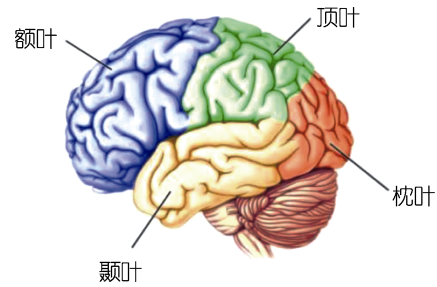


图 2 人类大脑 4 个主要功能区
Fig.2 The four main functional areas of the human brain

曾任行为认知神经学学会主席的安让·查特吉 (Anjan Chatterjee) 教授在著作《大脑审美》中提出的观点与心理学探索审美机制的结论一致: 不同于肢体上的感觉, 人脑中并没有一个或几个独立的区域负责审美^[14], 这是一个由躯体感知、情绪反应、经验判断等不同脑区功能完成的生理活动。在审美认知的过程中, 视觉刺激落在视网膜上之后, 信息将被传递到大脑后枕叶处, 此后被激活的脑区还包括丘脑、杏仁核、额叶、皮层、运动皮层等, 听觉刺激亦是如此。目前通过神经学实验探索审美认知过程与激活脑组织之间关系的研究, 涉及到具体的刺激及相应的被激活的脑组织部分见表 1^[15-23]。

表 1 审美认知与相应激活脑区研究
Tab.1 Research on aesthetic cognition and corresponding activation of brain regions

研究者	研究主题	刺激物	被激活脑组织
Alumit Ishai	性别和性取向对男性和女性面孔吸引力评级的作用	面孔图片	纹外皮层、颞上沟、杏仁核、岛叶、伏隔核、眶额皮层
Kirk, Skov Christensen 等	专业知识和背景信息对审美经验的影响	建筑物图片	内侧眶额皮层、前扣带皮层、伏隔核
Kirk, Skov, Hulme 等	艺术作品吸引力差别	艺术画作图片	内侧眼窝额叶
Thomas Jacobsen, Ricarda I. Schubotz 等	几何形状美感判断的神经相关性	抽象图形	额前皮层、双侧前额叶、后扣带回、左颞极、颞顶交界处、顶叶、运动区域、额正中皮层、左侧顶内沟
Calvo-Merino, Glaser, Grèzes, 等	专业知识对舞蹈动作观察的影响	舞蹈	运动皮层、顶叶区、颞上沟
Koelsch, Siebel	音乐情绪处理的模块化模型	音乐	杏仁核、伏隔核、海马旁回、眶额、腹内侧前额叶皮层
Khalifa, Schön, Anton 等	音乐的情感效价	音乐	双边腹侧、背侧纹状体、左前扣带、左海马旁回、杏仁核
Mitterschiffthaler 等	音乐传递的情感与其美学效果的影响机制	音乐	扣带皮层、腹侧前额叶皮层、腹侧纹状体、颞叶皮层

1.3 神经美学的研究方法

神经美学的探索方法可分为两类: 侵入性观测法和非侵入性观测法。

侵入性观测法是早期生物学家们探索人类脑功能的主要方式, 建立在解剖学和神经病理学的基础

上, 通过对脑损伤者进行皮层电刺激, 进而观察与审美或艺术知觉相关的区域。非侵入性观测技术的出现, 推动了神经学家们对脑组织和审美认知之间交互关系的研究, 因其能够在可控的情况下观测健康的被试大脑, 成为了目前的主流研究方法。可以细分为两类: 电生理学方法和影像学方法^[24]。

通过电生理学方法测量的脑电信号一般为自发脑电 (Electroencephalo-Gram, 简称 EEG)、诱发脑电 (Evoked Potential, 简称 EP) 和事件相关电位 (Event-Related Potential, 简称 ERP)。

自发脑电存在于中枢神经系统中, 能够直接反映大脑神经元的活动, 具有实时差异性, 是通过记录大脑皮层电极之间的电压测得的。EEG 的频域特征十分明显, 可按照频段不同, 分为 δ (0.5~4.0 Hz)、 θ (4~8 Hz)、 α (8~13 Hz)、 β (13~30 Hz) 和 γ (36~44 Hz) 5 种节律波, 分别对应睡眠状态、疲劳状态、清醒放松状态、情绪波动状态和亢奋激动状态^[25], 各个频段的节律波对审美认知的研究皆有重要的参考价值。例如 Fadeev 等发现 θ 波的强度可以反映认知控制机制的活动^[26]; 陈波等的研究发现前额区 α 波的功率可作为愉悦度指标^[27]。

对 EEG 实验数据进行滤波、分段、叠加平均等

操作后分离出事件相关电位, ERP 的特点是具有可达到毫秒级别的高时间分辨率, 用以获得被试在进行审美认知活动时极短的神经反应, 同时可持续监测大脑的生理信号变化^[28]。经典的 ERP 成分分为内源性 (生理性) 成分 (如 P1、N1、P2 等), 以及外源性 (心理性) 成分 (如 N2、N400、P300 等), ERP 成分不单单反应大脑的生理变化, 更主要的是能够反映出某些层面上的心理变化和认知过程。例如 P300 与信息处理的最后阶段和测量“认知效率”有关, 可反映被试的心理负荷和注意程度, 具体成分及参考作用如表 2 所示^[29-32]。

近几年发现的晚期正电位 (Late Positive Potential, LPP) 产生于情绪刺激之后, 与持续的情感注意相关, 可作为客观评价指标对产品外观进行评价^[33], 进一步印证了 ERP 成分在理解审美认知机制中的巨大作用。

表 2 经典 ERP 成分及对应参考作用
Tab.2 Classic ERP components and corresponding reference functions

研究者	关注成分	峰值出现时间	关联认知过程	结论
L.Elizabeth Crawford、 John T. Cacioppo	P1	刺激后 60~90 ms	视觉注意、空间定位信息捕捉	可作为衡量视觉刺激程度的客观指标, 负面情绪刺激将引发更大波幅
	N1	刺激后 100~150 ms		
Jiajin Y、Qinglin Z 等	P2	刺激后 140~200 ms	注意力分配	可作为衡量情绪效价的强度的客观指标, 大脑对负性情绪强度的变化更加敏感
	N2	刺激后 230~290 ms	对新颖、潜在显著刺激的注意分配	
Fuming Xu、Long Huang 李莹、刘俊等	P300	刺激后 350~500 ms	情绪唤醒	可作为注意力和工作记忆的标志
	N400	刺激后 400 ms 左右	语义加工	与语义理解相关, 且能够反映出语义构建的时间进程, 波幅与语义匹配程度呈负相关

运用影像学方法进行神经成像已被应用于研究审美的神经认知基础方面, 目前支持该方法的技术有: 功能性核磁共振成像 (fMRI)、脑磁图 (MEG)、正电子发射断层成像 (PET)、近红外光学成像技术 (NIRS) 等。其中通过功能性磁共振成像和脑磁图技术的研究成果较为可观^[24]。

功能性核磁共振成像是最常见的探索认知神经科学的途径, 不同于无法监测连续脑部活动的 ERP, fMRI 的优势在于具有高空间分辨率, 能够精准定位参与认知过程的脑活动功能区, 上述审美过程与相应激活脑区的研究便是通过该技术测得的。

脑磁图同时兼备上述二者的优点, 具有高时间分辨率和高空间分辨率。能够收集大脑的磁场变化, 反映出脑区域之间的功能连接机制, 进而搭建大脑系统中的网络通信轨道。在神经美学领域中, 已有研究者运用该技术更深层次地探索大脑的功能区域^[34]。Zhang 等通过 MEG 技术, 基于客观实验获得了被试判断美的神经机制, 并与主观判断进行对比分析, 得

知主观美或是客观美的判断都与大脑默认网络的活动密切相关, 与客观美相关的大脑活动涉及默认网络的负激活, 是一种朝向外在刺激加工时的大脑状态, 这一结果用实证的方式印证了哲学体系中“美在客体”这一观点^[35]。然而, 由于进行 MEG 实验的费用高昂、条件严苛、周期过长, 所以尚未广泛运用于对大脑审美认知机制的研究中^[36]。

2 神经美学相关技术研究和应用现状

经过文献检索, 神经美学相关研究主要集中于用户审美偏好、用户意象认知以及用户体验三大领域, 并已积累了部分研究成果, 进一步对这些应用实例和理论探索文献进行分析总结, 归纳出神经美学在用户研究领域的研究及应用现状, 该体系框架如图 3 所示。在运用神经美学相关理论解决实际问题的研究中, 相较于脑区激活, 情绪识别和认知过程解析更是关注的重点, 因此, 脑成像技术多用于验证辅助, 多数研究围绕脑电实验展开。

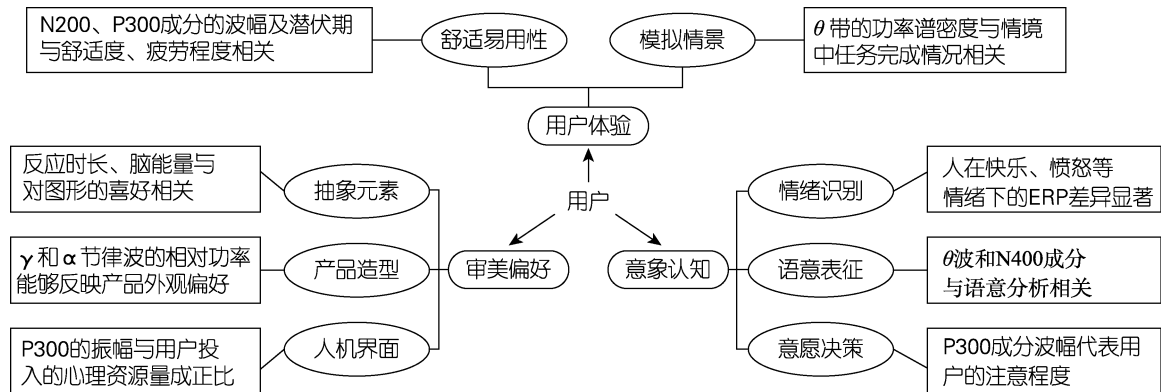


图3 神经美学在用户研究领域的研究及应用现状

Fig.3 Current status of research and application of neuro-aesthetics in the field of user research

2.1 审美偏好

情感需求的提升导致人们追求具有审美价值的产品, 并根据自己的审美偏好作出消费决定。在感性工学的范畴内, 为了更清楚地了解用户的评价, 研究者们多使用语义差异法 (Semantic differences, SD) 和李克特量表 (Likert Scale) 间接获得目标信息^[37-39], 但基于主观评价的结论缺乏客观、可视化的数据支撑, 因此仍存在局限性。人类的审美反应由感知触发, 神经美学因其研究大脑神经结构与认知机制之间的关系, 能够为用户偏好提供可视化客观凭证, 在该领域的探索方面有着巨大的优越性, 进而奠定了相关技术的应用基础。目前关于神经美学在审美偏好领域的研究主要分为抽象元素、产品外观、界面布局3个方向。

2.1.1 抽象元素

1) 颜色。在工业设计中, 颜色是人工制品较具表现力和吸引力的属性之一。工业产品的颜色能够以直接或间接的方式诱导某种知觉、理解或行为, 甚至给予用户功能上的暗示和心理上的感受。Mitani 等人通过 fMRI 实验测得枕回是与视觉处理和偏好评估任务相关的大脑区域, 对于涉及颜色选择任务的特定激活区域, 左梭形回、左岛叶和右前楔被显著激活^[40], 张宁宁等为研究颜色对驾驶员的视觉影响, 将黑、白色轿车图片作为刺激物进行脑电实验, 结果表明对黑色轿车图片刺激作出反映所需的时间更长, 且白色轿车图片能够激发更高的脑能量^[41]; 同样地, 颜色的审美研究也被广泛应用于室内和工业厂房等背景颜色创设中^[42]。

2) 图形。图形的审美偏好研究包括平面图形和三维图形。早期的研究中便指出: 人们对最简单的线条也会产生审美反应。一般情况下, 不规则的线条不能引发对美的判断, 对规则线条的喜好程度依次为: 圆形>直线>波浪线>圆弧线^[43]。在 Jacobsen 的实验中, 为了最大程度减弱被试的生活记忆、经验背景以及主观判断对结果的影响, 设计了一组如图4所示的由圆形、长方形、三角形构成的平面抽象图形^[44], 后续的

一系列研究发现: 大众普遍偏好对称的图形, 对抽象图形的审美虽然存在个体差异, 亦存在群体喜好倾向, 图形的复杂程度也是影响审美的重要因素。于2006年进行的 EEG 实验, 证明了作出审美判断所需时间更长, 过程中包含图形的对称性和复杂性判断^[45]。除不规则平面图形之外, 最近的研究发现, 人们对汉字的字体也会产生快速的、内隐的审美偏好^[46], 对数字界面的设计具有一定的参考价值。将 Gieles 超公式生成的环状 3D 图形作为刺激物的实验, 证明了群体对“流动性造型”的喜好程度更高, 这一经验可用于对产品接受度的预测^[47]。

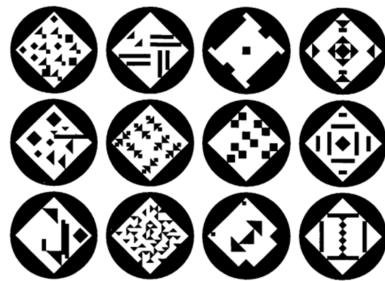


图4 Jacobsen 的实验中的平面抽象图形

Fig.4 Plane abstract graphics in Jacobsen's experiment

2.1.2 产品外观

在激烈的市场竞争中, 产品甚至包装的视觉美感都会成为构建品牌标识、刺激购买意愿的要素^[48-49]。以往的研究认为, 产品的美感主要依赖于对设计特征的物理感知, 但所谓的物理特征因产品而异, 神经美学的介入建立起了一个从消费者出发, 独立于产品物理特征的测量方法, 能够直接区分和量化被试对产品的审美偏好。例如 Hobkirk 等运用 fMRI 评估了电子烟使用过程中的大脑激活, 证明了大脑功能可以客观地衡量电子烟产品的成瘾潜力^[50]; γ 和 α 节律波的相对功率能够区分低、中、高视觉审美产品外观, γ 波功率在欣赏低视觉审美产品时将明显增强^[51], 左额叶 α 波功率降低说明被试处在更加愉悦的状态下^[52]。近年来, 研究者们将智能手机^[53]、加湿器^[54]、椅子^[55]

等日常用品作为刺激物, 验证了 ERP 成分也能够客观有效地使用户对产品的情感反馈外显。由于价格相对低廉, 私人神经营销咨询公司已广泛使用 EEG、ERP 方法测量用户对产品外观的喜好度^[56]。

2.1.3 数字界面

随着互联网的全领域覆盖, 体验经济的发展呈现出迅猛的态势, 随之衍生出的“用户黏性”这一概念快速成为了当下的研究热点。能够影响用户黏性的 2 个基础理论(心流体验理论与情感依恋理论), 均可溯回至心理学, 即对用户的研究^[57]。数字界面作为用户接收信息的媒介, 其构成元素在极大程度上决定了用户黏性的高低。

1) 图标。图标是数字界面的门户, 当下设计领域要求图标能够把用户带到高效的交互中, 因此图标的设计应能够准确传达内涵内容, 获得高认知效率。学者们注意到神经美学的探索方式能够为量化认知效率提供可靠途径, 并基于此展开了深入研究。易林楠通过分析 P300 成分的幅值, 发现亮度对比差异大的图标更容易被识别, 因此建议在界面设计过程中, 图标与界面背景亮度对比度应大于 70%^[58]; 任宏等通过对扁平化图标和拟物化图标刺激下的脑电特征进行分析对比, 结果表明青年用户能够更准确地接收扁平化图标传递的信息, 认知效率更高^[59]; 郝超基于 ERP 实验, 考察了图标的形象程度对内隐及外显记忆的影响, 发现形象图标在浅加工下进行无意识记忆具有明显的优势^[60]。

2) 布局。改变界面元素布局是提升美感、优化界面较高效的方法之一。研究表明, 网页中 LOGO 放置在右侧时, 被试大脑的激活区域和诱发的 P300 成分振幅均为最大, 左侧次之, 放置在中间最小, P300 的振幅与用户投入的心理资源量成正比, 并且 LOGO 放置在左右两侧比放置在中间更能吸引用户的注意^[61]; 官睿基于 Oddball 实验范式展开了研究, 总结了能够反映更优布局的 P300 等 ERP 成分的波形特点^[62]。界面元素布局是用户体验(UX)和用户界面(UI)视觉交互的重要影响要素, 可应用事件相关电位(ERP)、脑电图(EEG)和功能核磁共振成像(fMRI)的科学知识来理解 UI 和 UX 设计中的美学, 可用性和创造力也是当前研究可能的切入点^[63]。

2.2 意象认知

意象认知是指个体受到外界物理刺激后, 大脑相应功能区调动个体以往的记忆、经验, 对刺激加以理解、想象, 进而产生情感、重构形象的意识活动^[64], 见图 5。目前学界致力于对脑生理反应进行深入探索, 在用户情绪识别、意愿决策、语义表征方面所积累的成果, 对探讨人类意象认知的形成具有重要的理论和实践价值。

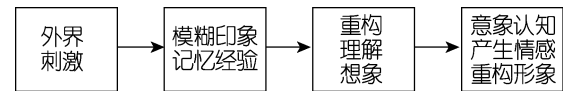


图 5 意象认知形成流程
Fig.5 Image formation process

2.2.1 情感测量

情感测量问题在人机交互和人工智能领域受到了广泛的关注^[65]。例如针对情绪量化的准确性和直观性的生理指标展开的研究^[66-68], 一方面, 将感官刺激与生物识别反应共同整合到对用户情绪的认识中, 能够对消费者接受意愿进行预测; 另一方面, 探究刺激物属性与情绪诱发脑机制之间的关联机制能够对情感化设计产生一定的指导意义。

2.2.1.1 视觉刺激

对视觉刺激的研究主要关注被试在实验过程中的关注度、愉悦度、情感强度等生理指标。大量研究表明, 被试在快乐、愤怒、厌恶和中性 4 种情绪下的 ERP 指标具有显著差异^[69]。在对普通话词语引发的情绪变化 ERP 实验中, 结果表明负面词汇将诱发更大的 P2 和 LPC 振幅, 相比之下, 中性词汇诱发的 N400 成分振幅更大^[70]。类似地, 将上述 ERP 实验运用于传播学对用户的研究中, 当以广告作为刺激物时, 品牌与产品关联度越高, 被试脑信号特定成分越平稳, 该品牌产品类型的搭配越容易为大众所接受^[71]。此外, 更有学者提出了基于生理信号采集的情绪评价系统, 例如 Yoo 等选用 36 张图片代表 6 种情绪作为刺激物进行实验, 分析了 α 、 β 、 γ 波的相对功率, 结合 EEG 以及其他生理数据提出了一种对人类情绪灵敏度进行评价的方法^[72], 沈旭昆等也提出了一种基于生物电传感的感知评估框架^[73], 验证了脑电信号可用于用户情感监测。

2.2.1.2 听觉刺激

心理学的研究发现, 非专业人士在进行美学判断时, 内在情感将起到决定性作用, 通过语言或音乐干预产生的愉悦感, 能够改善人们的精神状态^[74]。已有学者总结了音乐对听者情绪的影响, 对于能够诱发愉悦情绪的音乐, 通常会激活左后脑的活动, 被试脑电信号反应为: 额中区出现更多的 θ 波、 α 波^[75], 且情绪强度越强, α 波功率越小^[76]。在最近的研究中, 张伟震等发现无歌词音乐能够诱发 N400 成分, 有歌词音乐将触发 LPC 成分, 表明歌词能够影响大脑处理音乐情绪的进程^[77]。陈虹探究了完成不同难度的前景工作时, 背景音乐对情绪的调节作用, 在有、无背景音乐条件下, 简单任务和复杂任务分别在 P2 和 P3 成份上有显著差异, 结果表明在完成自动化程度不同的任务时, 个人喜爱的音乐都能够促进正性情绪的产生, 但在完成自动化程度低的任务时, 将对工作正确率产生一定影响^[78]。

2.2.1.3 其他知觉

目前,测量用户情感所采用的刺激类型并未限于视觉和听觉。食品或口腔护理产品的味道会直接影响消费者的情绪和体验,衣物的触感、香氛产品

的气味也必定与消费行为产生直接的联系,在气味发生器^[79]等设备的辅助下,探究多种知觉对用户情绪的影响也取得了进步和发展,近期相关研究如表3所示^[80-83]。

表3 生理知觉对用户情绪影响的研究
Tab.3 Research on the Influence of Physiological Perception on User Emotion

刺激类型	研究者	刺激物	实验目的或结论
味觉	Yue Chen、Qin Gao 等	5种常见口味的口腔护理产品	从反映味道情绪的敏感性、准确性和诱发情绪的效度3个方面对 EEG 信号进行评价,结合其他生理信号的数据开发了一个预测消费者对入口产品的整体态度和购买意向的综合模型。
味觉	Claudia、Sigfredo 等	9种啤酒	高发泡性和低苦味啤酒更能引发消费者愉悦的情感,啤酒中碳酸的味道会诱发轻松的感觉,但被试仍然可以保持清醒和专注。
嗅觉	唐帮备、陈胜男等	薄荷、硫磺、苹果3种香皂	嗅觉刺激诱发 P300 成分的波幅:薄荷味>硫磺味>苹果味。但硫磺味刺激性强,可能也是诱发波幅大的原因之一。
嗅觉/视觉	Thomas Hörberg、Maria Larsson 等	水果(柠檬、梨)、花(薰衣草、丁香)	通过分析 P300 效应推测,不协调的气味可能特别引人注意,从而吸引其他感官的进一步处理。
触觉	刘瑞	纹理、边角形不同的样本	P300 的峰值主要受触感舒适度的影响,触摸圆角材料时舒适感最强,峰值最低。

2.2.2 语义表征

语义启动是研究用户语义表征的一个重要范式,语义启动效应指启动刺激(Prime)将会对在其后出现的靶刺激(Target)产生促进作用。例如将“苹果”作为启动刺激时,被试对“菠萝”(靶刺激)的判断表现为反应时长更短、准确率更高,而当以“天空”为启动刺激时,便不会出现上述促进效果。如图6所示,语义启动效应可以用自动激活、被试预期、语义匹配3种机制来解释^[84],其中以语义匹配原理为出发点进行的实验经常被运用于用户研究领域中。

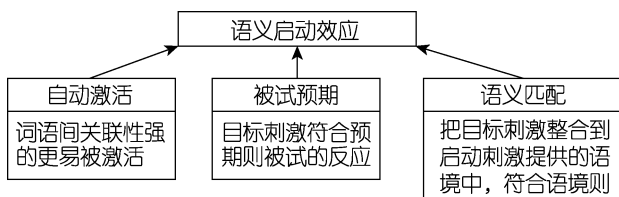


图6 语义启动效应
Fig.6 Semantic priming effect

2.2.3 意愿决策

在个体执行决策任务之前,需要经过复杂的信息处理认知过程。以往大量的研究证明,即时情绪不仅能够通常在通常情况下,通过影响认知来影响决策行为,还能够在刺激强烈时直接诱导个体快速作出决策^[85]。目前单独基于神经美学探讨用户意愿决策的研究较少,多是量化用户的审美偏好,并与神经营销学相结合,探究决策过程中相关的大脑神经活动。例如, Bai

等通过测量社交商务评论和电子商务评论诱发的 P300 成分波幅,得知社交商务评论中的好友信息能够吸引用户更多的注意力,从而影响消费者的购买意愿^[86];不同色彩标签诱发的用户情绪积极性不同,标签内容的意义和对标签颜色的感知都能激发用户对产品或服务进行评价和判断,进而作出决策,这一发现对电子商务等在线平台的标签设计有着重要的指导作用^[87]。

2.3 用户体验

用户体验是指用户在使用产品或体验服务过程中各方面行为反应和所得结果的总和,其自身的主观性、模糊性、动态性、环境依赖性,导致通过传统的例如访谈、问卷等回顾性方式测量所得的结果并不理想,于是学者们将神经美学引入用户体验的测量中,并结合被试主观评分与生理、神经反应,进而探索出多模态的用户体验测量方法^[88-91]。

2.3.1 舒适易用性

2.3.1.1 产品使用体验

由于实验器材精度的限制,目前运用相关技术测量实体产品使用体验的研究大部分关注基于脑机接口(BCI)系统的应用设计,如键盘、轮椅、外骨骼等^[92-93]。脑机接口拼写器使严重的运动障碍患者在没有肌肉活动的情况下也能够通过大脑活动进行交流, M.Teresa 等基于 P300 成分,测量了运动障碍参与者的拼写满意度,对3种尺寸的拼写器进行了可用性评估;除此之外, Niu 等收集并分析了20名受试者使

用战场态势图时的 P300 成分、反应时间和判断准确度数据, 结果表明低色度彩色符号的用户体验和效率优于高色度彩色符号, 并基于此结果提出了优化方案, 有助于缩短态势图使用过程中的识别和判断时间, 提高用户的操作性能^[94]。

2.3.1.2 数字媒体体验

对视觉材料进行合理的布局能够减轻用户的认知负荷, 使其注意更集中于关键信息, 减少大脑资源的损耗。康国芳以手机端软件“铁路 12306”为例进行了脑电实验, 分析了 N200、P300 成分的波幅及潜伏期, 认为针对该软件, 对字体进行适度放大、加粗处理能够减少用户投入的认知资源^[95]; 牛亚峰基于媒体界面构成元素的脑电评价指标和脑电阈值, 提出了一种数字界面的整体和局部 ERP 评估方法^[96]。随着视觉娱乐领域的不断发展, Zhang 等收集了 50 名游戏用户的主观评估和 fMRI 数据, 观察到互联网游戏障碍用户左背前扣带皮层 (dACC) 和双侧岛叶的激活率更高^[97]; 用户在虚拟现实系统中的“存在感”是评估该系统质量的一个关键参数, Athif 等提出了一种实验方法, 用以发现在不同存在水平的虚拟现实场景中, 用户的生物信号和心理变化之间的相关性, 实现对虚拟现实系统体验的优化^[98]。

2.3.2 模拟情境

近年来, 生理信号在人机工程学评价等领域中发挥了越来越重要的作用。在这类研究中, 用户的精神状态和工作负荷是主要的研究对象, 例如在社交情境中的媒体平台执行任务时产生的情绪波动, 在驾驶情境中由于不同任务引起的认知需求水平等都将直接影响用户的情绪表现, 其他精神状态如警惕性、情境意识、压力、困倦和精神投入也在近年来受到学界的广泛关注^[99-102]。Han 等构建了模拟驾驶环境, 通过采集受试者在使用汽车触模板不同模式下的 EEG 信号, 发现当用户感到某一交互模式相对舒适时, EEG 信号中 α 、 β 、 θ 和 γ 频段的功率谱密度会有所降低, 其中 θ 频段的变化最为明显^[103]; Mangion 等将受试者分成新用户和频繁用户 2 种, 要求所有参与者在 Facebook 上执行预定任务, 发现两类用户 θ 、 α 和 β 的频谱功率存在较大差异, 且差异主要出现在枕骨、额顶、额部和颞部, 这种测试方法将有助于开发人员创建最佳的、用户友好的软件产品^[104]。Iqbal 等捕获了反应控制室操作人员初始工作负荷的 EEG 电位, 同样发现 θ 的功率谱密度与参与者在任务中的微小成功或失败有很好的相关性, 并基于此提出了一种评价操作者心理和实际过程行为之间的匹配模型^[105]。

3 现存主要挑战

神经美学应用于用户研究领域的主要驱动力一方面来自于人们日益增长的对产品或服务的情感需

求, 另一方面来自于科技的进步促使人们对人脑与审美之间关联的探索更加深入, 但当前的神经科学方法仅擅长研究稳定且相对普遍的思维特性^[106]。下面将通过整理并归纳神经美学在用户研究领域的研究现状, 从实验设计可行性、数据采集精准度和研究方法普适性 3 个维度总结其现存的主要挑战。

3.1 实验设计可行性

EEG 实验的准备过程相对烦琐, 需要被试提前将头皮表面的油渍清洗干净, 再向电极和头皮中间注射导电膏或生理盐水等介质以增强导电性, 准备时间普遍在 30 min 以上; 由于实验结果需要叠加平均, ERP 实验所需时间将更长, 而 fMRI 和 MEG 实验与脑电实验相比成本更高, 所以技术限制导致实验被试招募难度大, 数量少。神经美学实验结果与被试的个人状态有着较强的关联, 虽然刺激是客观的, 但个人审美判断的程度并不客观, 对刺激特征产生反应的加权方式因人而异, 预实验可能无法完全准确反应该实验设计的成功与否^[113,107-109]。因此, 关于实验设计可行性问题, 需要明确两点: 实验能否可以得到想要观察的对象; 实验变量是否可以与试图验证的假设相匹配。

譬如在众多“审美判断的本质”研究中, 通过 fMRI 实验证明了前额皮层和中前额皮层的部分区域参与美学判断的过程, 但这些研究并没有绝对明确上述大脑区域的活跃是特定用于审美判断的, 或是这种现象仅是神经系统的一部分, 无论涉及何种领域, 用户都会作出判断^[110-112]; 在“审美偏好”的研究中, 目前的研究方法是对偏好进行分解, 偏好在艺术领域之外还存在很多不同的关联, 例如 Fingerhut 等提出在审美活动过程中, 强调 3 个亚情感成分: 认知困惑、感性参与和崇敬感。人们可能会探索附属于偏好的或样本的其他属性, 比如复杂性与偏好的关系, 或注意程度与偏好的关系, 然而, 对这类细分问题的探索很容易掩盖偏好本身与审美体验的关系这一基本问题^[113-115]。因此, 保证实验设计较高的可行性将可以有效避免重复实验, 大幅降低研究的时间成本, 是当下提高研究效率的主要途径。

3.2 数据采集精准度

上述神经美学探索方式对实验环境也有着较高的要求。由于大脑的神经反应易受到外界的干扰, 需要在相对安静并远离电、磁、光等信号干扰的环境中进行, 受试者的肢体行为、自身条件 (头发厚度、卷曲度) 也将为后续的数据处理带来困扰^[116], 以至于目前得到明确成果的实验素材多是可以让受试者处于静止状态的图片、视频、嗅觉类素材、味道类素材等。虽然, 近年来新兴的如图 7 所示的穿戴式大脑状态监测设备为在实验室外进行测量提供了可能性, 但随着实验时间的推移, 受试者认为除了使用导电膏的电极帽以外, 其他设备都不同程度地存在不舒适的问

题,这一体验亦会影响受试者的情绪,进而降低实验结果的可信度,以致学界在用户体验方向的研究依然进展缓慢^[117-119]。



图7 穿戴式大脑状态监测设备
Fig.7 Wearable brain state monitoring equipment

除其他无关信号干扰以外,设备本身的精度也是科研领域需要面对的一大挑战,例如大部分实验使用的刺激可能主要到达皮层部位,而审美体验可能与皮层下结构的参与有关,这一问题目前只能通过经颅磁刺激(TMS)和经颅直流刺激(tDCS)进行间接干预^[120],因此,生理信号采集设备的精度不足也是目前亟待解决的主要问题。

3.3 研究方法普适性

近10年来随着神经美学体系日渐成熟,用户研究已经从记忆、语言、情绪的认知神经科学等更加成熟的领域中吸取了大量经验,逐渐挖掘出了用户审美、认知、体验过程中脑神经元时间、空间的响应特性^[121-122]。

艺术和人文学科擅长描述人类经验的复杂性和细微差别,神经美学属于实证科学的范畴,在目前的研究背景下,其实验需要基于普遍框架,并对预先的假设或猜想进行验证,这在认知神经科学的范畴中属于反向推理问题,研究成果的商业用途在于对产品、服务、设计方案的评定,以及在广告营销策划中对客户决策的预测^[123],神经美学在用户研究领域的根本目的是“投其所好”,服务于用户,技术特殊性意味着企业将能够明晰触发诱导用户购买行为的机制,用户将变得透明,而这并不符合市场规律^[124-125],无法成为新兴探索方式投入市场,因此,完善神经美学在用户研究领域的研究体系,形成能够保护用户隐私,适用于市场的普适方法成为了另一个重要挑战。

4 展望

神经美学作为一门美学与实证科学交叉的学科,其理论和应用研究在依赖两学科发展的基础上,也必将形成自身的发展方向。在“以人为本”理念渗透至商业、教育、医疗、设计等领域的时代大背景下^[126],神经美学也因其得天独厚的优势促进了学界对“人”的探索,只不过目前尚未形成其发展的完整理论。本文基于神经美学在用户研究领域的发展梳理了在实验设计的可行性、数据采集的精准度、研究方法的普适性3个方面的挑战,结合国内外最新研究,提出了其发展的3个方向:促进效能提升、优化美学计算、

扩展应用范围。如图8所示,3个发展方向形成了“技术-理论-突破”的层次关系。

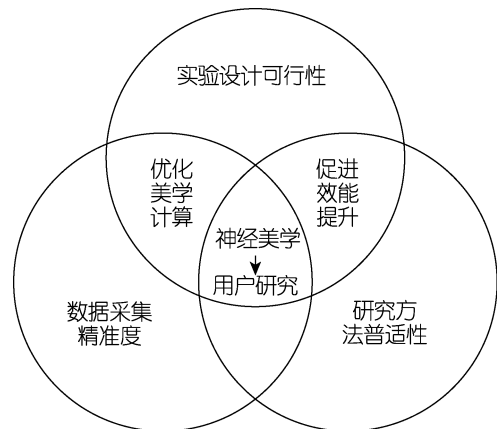


图8 神经美学在用户研究领域应用面临的挑战及发展间的交叉关系

Fig.8 The application of neuro-aesthetics in the field of user research faces the challenges and the cross-relationship between development

4.1 促进效能提升

效能提升是神经美学实验在当前得出有效结论的基础上更深层次的目标,依赖于实验目的明确、研究对象匹配、实验设计切实可行和研究方法接受程度高、容错性强等条件得以实现。一方面,从科技背景来看,随着AR、VR技术的持续进步,高强度的模糊现实感或许可以在一定程度上弥补生理信号测量设备精度不足的缺陷^[127-129]。另一方面,为了探索在普适方法中兼容不同用户差异化需求的测量方式,目前国内外学者都在尝试综合脑电信号与眼动信号、皮肤电信号、呼吸、心率等多种生理量对用户情感进行采集,Zhao等的研究验证了脑电信号与眼动信号融合的测量结果在大多数情况下均优于单个信号^[130-131]。从短期来看,各个生理指标相互佐证,辩证分析,使实验结果更加切实可靠,从长远看来,这种多通道输入反馈机制的构建将有利于高效、准确地预测不同类型用户的意象、偏好,是指导设计实践、提供支持性客观数据、减少决策主观性、片面性的有效途径,可以促进相关研究效能显著提升,在情感化设计时代下,有利于企业充分把握得到用户青睐的机会窗口。

4.2 优化美学计算

人工智能参与美学计算过程,能够使生理信号识别、分类更加准确^[132-133]。为获取更加贴合实际情况的生理信号数据,神经美学实验设计可行性与数据采集精准度两方面至关重要,主要依赖技术的发展实现精准测量,精准测量是将情感量化为参考要素以指导产品和服务的设计的前提。在最近的研究中,Yu等提出了一种基于集成学习方法AdaBoost的脑电信号情感识别方法,识别准确率得到了显著提升^[134-139],

为了利用这种创新方法来研究艺术与大脑之间的关系, 多学科融合的方法是必不可少的, 统计学、计算机技术的引入, 将有利于建立更全面的数学模型, 使美学计算理论具有连贯性。届时建立的用户情感、认知、体验的量化模型质量将大幅优于以往的评估模型, 美学计算的精细化水平将得到提升。

4.3 扩展应用范围

在实现数据收集精准、研究方法普适之后, 以用户的情感为核心出发点, 突破现有的研究框架, 针对各领域用户研究的需求特点, 大规模拓宽神经美学研究手段的应用范围将成为更具前景的发展方向。目前设计学科、商业营销、艺术治疗几大方向受益于神经美学在用户研究领域的研究成果^[140-143], 已在各自领域的理论层面渐成体系, 在技术和理论深度融合下, 利用愈发完善的科学技术配合主客观结合的测量方式, 将改善用户的情感体验, 进一步填补该方向的研究缺口^[144]。以用户情感诉求为导向, 调动各学科、全行业加入探索行列, 持续挖掘相关技术在认知神经机制研究上的潜能, 神经美学在用户研究领域的扩展应用将能够超越其当前的现状(目标为关联大脑功能与行为), 开始解释大脑活动与艺术欣赏现象学之间的联系^[145]。

5 结语

神经美学在用户研究领域的贡献促进了对人类脑功能和审美思维模式的理解^[146]。“情感化”设计趋势下, 神经美学将有广阔的发展前景, 甚至有可能转化为工业生产新的增长点^[147]。在未来的用户研究领域中, 深度融合神经美学的研究技术, 重视用户的情感偏好, 才能与时俱进, 服务于人。

本文对神经美学有关理论及应用文献进行了梳理, 从用户审美偏好、意象认知、用户体验 3 个方面, 总结了神经美学常用的研究方法在探索用户脑神经活动上的研究成果和应用现状, 阐述了当前产学研界在实验设计可行性、数据采集精准度、研究方法普适性 3 个维度存在的问题, 并针对上述挑战从促进效能提升、优化美学计算、扩展应用范围 3 个层面对神经美学在用户研究领域的发展进行了展望。本文在认知神经学技术应用广度与深度方面的研究尚存不足, 在后续研究中将拓宽神经美学应用于用户研究领域的认识。

参考文献:

- [1] FISHWICK M. Emotional Design: Why we Love (or Hate) Everyday Things[J]. *The Journal of American Culture*, 2004, 27(2): 234.
- [2] 唐纳德·A. 诺曼. 设计心理学[M]. 梅琼, 译. 北京: 中信出版社, 2010.
- [3] 袁圣婴. 视觉艺术与大脑——论塞米尔·泽基及其神经美学[J]. *南京艺术学院学报(美术与设计版)*, 2014(5): 93-97, 8.
- [4] YUAN Sheng-ying. Visual Arts and the Brain: The Discussion of Semir Zeki's Neuroaesthetics Theories[J]. *Journal of Nanjing Arts Institute (Fine Arts & Design)*, 2014(5): 93-97, 8.
- [5] BRIELMANN A A, PELLI D G. Beauty Requires Thought[J]. *Current Biology*, 2017, 27(10): 1506-1513.e3.
- [6] 李志宏, 李伟. 认知神经美学: 一个新兴的学派[J]. *上海文化*, 2019(4): 20-26, 124.
- [7] LI Zhi-hong, LI Wei. Cognitive Neurological Aesthetics: An Emerging School of Thought[J]. *Shanghai Culture*, 2019(4): 20-26, 124.
- [8] LI Zhi-hong, WANG Yan-hui, MENG Fan-jun. Aesthetic Cognitive Module Theory: A Core Structure[J]. *The Journal of Aesthetic Education*, 2018, 52(2): 71.
- [9] BYNUM H. Neuroarthistory: From Aristotle and Pliny to Baxandall and Zeki[J]. *JAMA*, 2008, 300(20): 2433.
- [10] ALAIS D. Inner Vision: An Exploration of Art and the Brain[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2000, 4(9): 362.
- [11] SU Chong. The Aesthetic Actualization of Gestalt Image in English Translation of Chinese Poems[J]. *International Journal of English Linguistics*, 2017, 8(2): 233.
- [12] LEDER H, NADAL M. Ten Years of a Model of Aesthetic Appreciation and Aesthetic Judgments: The Aesthetic Episode-Developments and Challenges in Empirical Aesthetics[J]. *British Journal of Psychology (London, England: 1953)*, 2014, 105(4): 443-464.
- [13] PEARCE M T, ZAIDEL D W, VARTANIAN O, et al. Neuroaesthetics: The Cognitive Neuroscience of Aesthetic Experience[J]. *Perspectives on Psychological Science: a Journal of the Association for Psychological Science*, 2016, 11(2): 265-279.
- [14] SHAHBAHRAMI A, NAJAFI K, NAJAFI T, et al. Different Application Fields of Brain Signal Processing in Iran[J]. *Signal and Data Processing*, 2016, 13(3): 129-154.
- [15] 杨程, 彭怡腾, 唐智川. 泛设计领域中的脑电研究现状与发展趋势[J]. *包装工程*, 2020, 41(16): 64-75.
- [16] YANG Cheng, PENG Yi-teng, TANG Zhi-chuan. Research Status and Development Trend of EEG in Pan Design[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(16): 64-75.
- [17] SEELEY W P. "Book-Review" the Aesthetic Brain: How we Evolved to Desire Beauty and Enjoy Art[J]. *The Journal of Aesthetics and Art Criticism*, 2016, 74(4): 430-432.
- [18] NADAL M, PEARCE M T. The Copenhagen Neu-

- roaesthetics Conference: Prospects and Pitfalls for an Emerging Field[J]. *Brain and Cognition*, 2011, 76(1): 172-183.
- [16] JACOBSEN T, SCHUBOTZ R I, HÖFEL L, et al. Brain Correlates of Aesthetic Judgment of Beauty[J]. *NeuroImage*, 2006, 29(1): 276-285.
- [17] ISHAI A. Sex, Beauty and the Orbitofrontal Cortex[J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2007, 63(2): 181-185.
- [18] KIRK U, SKOV M, CHRISTENSEN M S, et al. Brain Correlates of Aesthetic Expertise: A Parametric fMRI Study[J]. *Brain and Cognition*, 2009, 69(2): 306-315.
- [19] KIRK U, SKOV M, HULME O, et al. Modulation of Aesthetic Value by Semantic Context: An fMRI Study[J]. *NeuroImage*, 2009, 44(3): 1125-1132.
- [20] CALVO-MERINO B, GLASER D E, GRÈZES J, et al. Action Observation and Acquired Motor Skills: An fMRI Study with Expert Dancers[J]. *Cerebral Cortex*, 2004, 15(8): 1243-1249.
- [21] KOELSCH S, SIEBEL W A. Towards a Neural Basis of Music Perception[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2005, 9(12): 578-584.
- [22] KHALFA S, SCHON D, ANTON J L, et al. Brain Regions Involved in the Recognition of Happiness and Sadness in Music[J]. *NeuroReport*, 2005, 16(18): 1981-1984.
- [23] MITTERSCHIFFTHALER M T, FU C H Y, DALTON J A, et al. A Functional MRI Study of Happy and Sad Affective States Induced by Classical Music[J]. *Human Brain Mapping*, 2007, 28(11): 1150-1162.
- [24] 胡俊. 艺术·人脑·审美——当代西方神经美学的研究进展、意义和愿景[J]. *文艺理论研究*, 2015, 35(4): 164-172.
- HU Jun. Art, Brain and Aesthetics: On the Development, Significance and Vision of Contemporary Western Neuroaesthetics[J]. *Theoretical Studies in Literature and Art*, 2015, 35(4): 164-172.
- [25] 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.
- [26] FADEEV K A, SMIRNOV A S, ZHIGALOVA O P, et al. Too Real to be Virtual: Autonomic and EEG Responses to Extreme Stress Scenarios in Virtual Reality[J]. *Behavioural Neurology*, 2020, 2020: 5758038.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] CRAWFORD L E, CACIOPPO J T. Learning where to Look for Danger: Integrating Affective and Spatial Information[J]. *Psychological Science*, 2002, 13(5): 449-453.
- [30] 李莹, 刘俊, 张灿, 等. 不同性质的汉语高熟悉度隐喻意义加工过程——来自 ERP 研究的证据[J]. *心理学探新*, 2019, 39(4): 337-344.
- LI Ying, LIU Jun, ZHANG Can, et al. Cognitive Processes of Chinese High Familiar Metaphors with Different Semantic Properties: Evidence from an ERP Study[J]. *Psychological Exploration*, 2019, 39(4): 337-344.
- [31] XU Fu-ming, HUANG Long. Electrophysiological Measurement of Emotion and Somatic State Affecting Ambiguity Decision: Evidences from SCRS, ERPs, and HR[J]. *Frontiers in Psychology*, 2020, 11: 899.
- [32] YUAN Jia-jin, ZHANG Qing-lin, CHEN An-tao, et al. Are we Sensitive to Valence Differences in Emotionally Negative Stimuli? Electrophysiological Evidence from an ERP Study[J]. *Neuropsychologia*, 2007, 45(12): 2764-2771.
- [33] NITTONO H. P1-55. Late Positive Potentials Associated with the Attractiveness of the Appearances of Commercial Goods[J]. *Clinical Neurophysiology*, 2013, 124(8): e35.
- [34] BAILLET S. Magnetoencephalography for Brain Electrophysiology and Imaging[J]. *Nature Neuroscience*, 2017, 20(3): 327-339.
- [35] ZHANG Wei-xia, LIU Fang, ZHOU Lin-shu, et al. The Effects of Timbre on Neural Responses to Musical Emotion[J]. *Music Perception*, 2019, 37(2): 134-146.
- [36] 李艳, 陈楚玲. 认知神经学视域下视觉艺术美学理论实证研究方法探索[J]. *装饰*, 2019(4): 108-111.
- LI Yan, CHEN Chu-ling. Exploring the Empirical Research Method of Visual Art Aesthetic Theory from the Perspective of Cognitive Neurology[J]. *Art & Design*, 2019(4): 108-111.
- [37] JINDO T, HIRASAGO K. Application Studies to Car Interior of Kansei Engineering[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 1997, 19(2): 105-114.
- [38] DEWI D S, IRFONI A R, RAHMAN A. Kansei Engineering Approach for Designing a Self-Monitoring Blood Glucose Application[J]. *International Journal of Technology*, 2017, 8(2): 272.
- [39] SHIGEMOTO Y. Designing Emotional Product Design: When Design Management Combines Engineering and Marketing[M]//*Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer International Publishing, 2019: 28-39.

- [40] MITANI K, HOSHINO Y. Verification for Commonality or Specificity of Brain Representations Related to the Different Evaluation Criteria[J]. *International journal of innovative computing, information and control*, 2018, 14(5): 1553-1563.
- [41] 张宁宁, 王宏, 王剑. 基于 ERP 方法的白/黑色轿车诱发脑电分析[J]. *汽车工程*, 2010, 32(9): 814-817.
ZHANG Ning-ning, WANG Hong, WANG Jian. An Analysis on Cerebral Electricity Evoked by the Colors of White and Black Cars Based on ERP Method[J]. *Automotive Engineering*, 2010, 32(9): 814-817.
- [42] 于光, 黄丽, 葛秋芬, 等. 关于颜色的心理学研究进展[J]. *社会心理科学*, 2011(10): 30-34.
YU Guang, HUANG Li, GE Qiu-fen, et al. Research Progress of Color Psychology[J]. *Science of Social Psychology*, 2011(10): 30-34.
- [43] BERLYNE D E. Novelty and Attention: Controls for Retinal Adaptation and for Stimulus-Response Specificity[J]. *Psychonomic Science*, 1971, 25(6): 755-766.
- [44] JACOBSEN T, HÖFEL L. Aesthetic Judgments of Novel Graphic Patterns: Analyses of Individual Judgments[J]. *Perceptual and Motor Skills*, 2002, 95(3 Pt 1): 755-766.
- [45] 陆峥. 中国传统绘画空间构图的审美心理实验研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
LU Zheng. Experimental Studies on the Aesthetics of Spatial Composition in Traditional Chinese Paintings[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [46] LI Rui, QIN Rui-lin, ZHANG Jun-song, et al. The Esthetic Preference of Chinese Typefaces-an Event-Related Potential Study[J]. *Brain Research*, 2015, 1598: 57-65.
- [47] CHEW L H, TEO J, MOUNTSTEPHENS J. Aesthetic Preference Recognition of 3D Shapes Using EEG[J]. *Cognitive Neurodynamics*, 2016, 10(2): 165-173.
- [48] HSIAO K L, CHEN C C. What Drives Smartwatch Purchase Intention? Perspectives from Hardware, Software, Design, and Value[J]. *Telematics and Informatics*, 2018, 35(1): 103-113.
- [49] SIMMONDS G, SPENCE C. Thinking Inside the Box: How Seeing Products On, or Through, the Packaging Influences Consumer Perceptions and Purchase Behaviour[J]. *Food Quality and Preference*, 2017, 62: 340-351.
- [50] HOBKIRK A L, BITZER Z, GOEL R, et al. An Electronic Aerosol Delivery System for Functional Magnetic Resonance Imaging[J]. *Substance Abuse: Research and Treatment*, 2020, 14: 117822182090414.
- [51] GUO Fu, LI Ming-ming, HU Ming-cai, et al. Distinguishing and Quantifying the Visual Aesthetics of a Product: An Integrated Approach of Eye-Tracking and EEG[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2019, 71: 47-56.
- [52] 贺玲姣. 不同声刺激下的情绪反应与识别[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
HE Ling-jiao. Affective Reaction and Emotion Identification Induced by Different Sound Stimuli[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [53] 郭伏, 丁一, 张雪峰, 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, 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.
- [54] 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.
- [55] 杨程, 曾静, 陈辰, 等. 基于脑电探究外观特征对产品识别的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(9): 1385-1394.
YANG Cheng, ZENG Jing, CHEN Chen, et al. Investigation on Effect of Appearance Characteristics on Product Identity Based on EEG[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(9): 1385-1394.
- [56] HAKIM A, LEVY D J. A Gateway to Consumers' Minds: Achievements, Caveats, and Prospects of Electroencephalography-Based Prediction in Neuromarketing[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews Cognitive Science*, 2019, 10(2): e1485.
- [57] 王立明, 李晓东, 李啸虎, 等. 消费者心流体验、情感依恋与粘性行为研究——基于预订类旅游 App 的实证分析[J]. *新疆财经*, 2021(1): 49-59.
WANG Li-ming, LI Xiao-dong, LI Xiao-hu, et al. A Study of Flow Experience, Emotional Attachment and User Stickiness Behavior—An Empirical Analysis Based on Booking Travel App[J]. *Finance & Economics of Xinjiang*, 2021(1): 49-59.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 郝超. 基于无意识设计的数字阅读产品交互设计研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
HAO Chao. Research on Interaction Design of Digital

- Reading Products Based on Unconscious Design[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [61] DONG Ying-ying, XUE Cheng-qi, PENG Ning-yue, et al. The Effect of LOGO Location in Navigation Bar on Web Brand Recognition Based on Event-Related Potential[M]//HCI in Business, Government, and Organizations. Cham: Springer International Publishing, 2018: 262-274.
- [62] 官睿. 基于 ERP 技术的界面信息认知和布局研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
GUAN Rui. Research of Interface Information Cognition and Layout Based on ERPS[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [63] RUI Zhe-peng, GU Zhen-yu. A Review of EEG and fMRI Measuring Aesthetic Processing in Visual User Experience Research[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2021, 2021: 2070209.
- [64] 胡婷婷, 赵江洪, 赵丹华. 设计师和用户的汽车造型意象认知差异研究[J]. 包装工程, 2015, 36(24): 33-36.
HU Ting-ting, ZHAO Jiang-hong, ZHAO Dan-hua. Imagery Cognition Differences between Designers and Users Automobile Modeling[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(24): 33-36.
- [65] 柳长源, 李文强, 毕晓君. 基于脑电信号的情绪特征提取与分类[J]. 传感技术学报, 2019, 32(1): 82-88.
LIU Chang-yuan, LI Wen-qiang, BI Xiao-jun. Emotional Feature Extraction and Classification Based on EEG Signals[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(1): 82-88.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 王欢. 基于多模式测量的考虑多维变量的产品外观情感设计方法研究——以烤面包机产品为例[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
WANG Huan. Product Appearance Emotional Design of Multi-Dimensional Variables Based on Multi-Mode Measurement—Take Toast for Example[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [69] ZHU Li, SU Chong-wei, ZHANG Jian-hai, et al. EEG-Based Approach for Recognizing Human Social Emotion Perception[J]. Advanced Engineering Informatics, 2020, 46: 101191.
- [70] GU Bei-xian, WANG Hui-li, BELTRÁN D, et al. Embodied Processing of Disgust in Mandarin Words: An ERP Study[J]. Journal of Neurolinguistics, 2021, 58: 100981.
- [71] 卢小雁, 许今茜. 基于事件相关电位的广告传播效果实验测评方法[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(11): 266-269.
LU Xiao-yan, XU Jin-qian. Research on the Measurement and Analysis of Advertising Media Effects Based on Event-Related Potentials[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2019, 38(11): 266-269.
- [72] YOO G, HONG S. Emotion evaluation analysis and system design of biosignal[C]//2016 International Conference on Platform Technology and Service (Plat-Con). Jeju, Korea (South). IEEE, : 1-4.
- [73] 沈旭昆, 闫烁. 基于生物电传感的受众感知探索与研究[J]. 包装工程, 2021, 42(10): 26-31.
SHEN Xu-kun, YAN Shuo. Exploration and Research on Audience Perception Based on Bioelectric Sensing[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(10): 26-31.
- [74] MÜLLER M, HÖFEL L, BRATTICO E, et al. Aesthetic Judgments of Music in Experts and Laypersons—An ERP Study[J]. International Journal of Psychophysiology, 2010, 76(1): 40-51.
- [75] FRIED R. Integrating Music in Breathing Training and Relaxation: II[J]. Biofeedback and Self-Regulation, 1990, 15(2): 171-177.
- [76] 王静梅, 钱靓, 卢英俊. 音乐对情绪影响的脑电机制初探[J]. 中国医药导报, 2010, 7(32): 11-13.
WANG Jing-mei, QIAN Liang, LU Ying-jun. Research on EEG Mechanisms of Music Influence Emotions[J]. China Medical Herald, 2010, 7(32): 11-13.
- [77] 张伟霞, 王莞琪, 周临舒, 等. 歌词对音乐情绪加工的影响: 行为与 ERP 研究[J]. 心理学报, 2018, 50(12): 1346-1355.
ZHANG Wei-xia, WANG Wan-qi, ZHOU Lin-shu, et al. Effects of Lyrics on the Processing of Musical emotion: Behavioural and ERP Study[J]. Acta Psychologica Sinica, 2018, 50(12): 1346-1355.
- [78] 陈虹. 背景音乐对前景工作情绪影响的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
CHEN Hong. Study on the Influence of Background Music on the Mood of Prospective Work[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [79] 有慧, 王剑, 刘剑锋, 等. 应用 OEP-98C 型嗅觉诱发电位仪进行事件相关设计嗅觉功能磁共振成像[J]. 中国医学科学院学报, 2009, 31(2): 134-138, 254.
YOU Hui, WANG Jian, LIU Jian-feng, et al. Olfactory Functional Magnetic Resonance Imaging with Modified OEP-98C Olfactometer and Event-Related Design[J]. Acta Academiae Medicinae Sinicae, 2009, 31(2): 134-138, 254.

- [80] CHEN Yue, GAO Qin, LV Qiao-lu, et al. Comparing Measurements for Emotion Evoked by Oral Care Products[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2018, 66: 119-129.
- [81] GONZALEZ VIEJO C, FUENTES S, HOWELL K, et al. Integration of Non-Invasive Biometrics with Sensory Analysis Techniques to Assess Acceptability of Beer by Consumers[J]. *Physiology & Behavior*, 2019, 200: 139-147.
- [82] 唐帮备, 陈胜男, 贺小龙, 等. 基于嗅觉诱发脑电分析的产品气味用户体验测评及装置[J]. *机械设计*, 2020, 37(12): 129-138.
TANG Bang-bei, CHEN Sheng-nan, HE Xiao-long, et al. User-Experience Evaluation of Product Odor and the Related Device Based on the Olfactory Evoked EEG Analysis[J]. *Journal of Machine Design*, 2020, 37(12): 129-138.
- [83] HÖRBERG T, LARSSON M, EKSTRÖM I, et al. Olfactory Influences on Visual Categorization: Behavioral and ERP Evidence[J]. *Cerebral Cortex (New York, N Y: 1991)*, 2020, 30(7): 4220-4237.
- [84] 郭桃梅, 彭聃龄. 从语义启动效应看事件相关电位 N400 的实质[J]. *心理科学*, 2003, 26(4): 750-746.
GUO Tao-mei, PENG Dan-ling. On the Essence of Event-Related Potential N400 from Semantic Priming Effect[J]. *Psychological Science*, 2003, 26(4): 750-746.
- [85] 王钰. 情绪影响决策过程与结果评价的认知神经机制[D]. 天津: 天津师范大学, 2012.
WANG Yu. Cognitive Neural Mechanism Affecting Emotional Decision-Making Process and Outcome Evaluation[D]. Tianjin: Tianjin Normal University, 2012.
- [86] BAI Yan, YAO Zhong, CONG Feng-yu, et al. Event-Related Potentials Elicited by Social Commerce and Electronic-Commerce Reviews[J]. *Cognitive Neurodynamics*, 2015, 9(6): 639-648.
- [87] XU Chen, ZHANG Qin. The Dominant Factor of Social Tags for Users' Decision Behavior on E-Commerce Websites: Color or Text[J]. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 2018: asi.24118.
- [88] BAI A, FUGLERUD K S. Method for Semi-Automated Evaluation of User Experience Using Brain Activity[J]. *Studies in Health Technology and Informatics*, 2018, 256: 811-820.
- [89] LAW E L C, VAN SCHAİK P, ROTO V. Attitudes towards User Experience (UX) Measurement[J]. *International Journal of Human-Computer Studies*, 2014, 72(6): 526-541.
- [90] DING Yi, GUO Fu, HU Ming-cai, et al. Using Event Related Potentials to Investigate Visual Aesthetic Perception of Product Appearance[J]. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 2017, 27(5): 223-232.
- [91] DING Yi, GUO Fu, ZHANG Xue-feng, 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.
- [92] PFURTSCHELLER G, MÜLLER 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(1): 33-36.
- [93] 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): e61.
- [94] NIU Ya-feng, MA Guo-rui, XUE Wei, et al. Research on the Colors of Military Symbols in Digital Situation Maps Based on Event-Related Potential Technology[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2020, 9(7): 420.
- [95] 康国芳. 手机界面中图形单元的认知负荷研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
KANG Guo-fang. Research on Cognitive Load of Graphic Unit in Mobile Phone Interface[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [96] 牛亚峰. 基于脑电技术的数字界面可用性评价方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
NIU Ya-feng. Usability Evaluation Methods Research of Digital Interface Based on Brain Electrical Technology[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [97] ZHANG Jia-lin, DONG Hao-hao, ZHAO Zhen, et al. Altered Neural Processing of Negative Stimuli in People with Internet Gaming Disorder: fMRI Evidence from the Comparison with Recreational Game Users[J]. *Journal of Affective Disorders*, 2020, 264: 324-332.
- [98] ATHIF M, RATHNAYAKE B L K, NAGAHAPITIYA S M D B S, et al. Using Biosignals for Objective Measurement of Presence in Virtual Reality Environments[J]. 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), 2020: 3035-3039.
- [99] ARICÒ P, BORGHINI G, DI FLUMERI G, et al. Adaptive Automation Triggered by EEG-Based Mental Workload Index: A Passive Brain-Computer Interface Application in Realistic Air Traffic Control Environment[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2016, 10: 539.
- [100] ARICÒ P, BORGHINI G, DI FLUMERI G, et al. Human Factors and Neurophysiological Metrics in Air Traffic Control: A Critical Review[J]. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 2017, 10: 250-263.
- [101] BORGHINI G, ARICÒ P, DI FLUMERI G, et al. Correlation and Similarity between Cerebral and Non-Cerebral Electrical Activity for User's States Assess-

- ment[J]. *Sensors*, 2019, 19(3): 704.
- [102] CHERUBINO P, MARTINEZ-LEVY A C, CARATÙ M, et al. Consumer Behaviour through the Eyes of Neurophysiological Measures: State-of-the-Art and Future Trends[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2019, 2019: 1976847.
- [103] HAN Shu-hang, KONG Yao-hui, LEI Zhi-gao, et al. Evaluation method of human-vehicle tactile interaction experience based on EEG[C]//2020 12th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC). Hangzhou, China. IEEE: 75-78.
- [104] MANGION R S, GARG L, GARG G, et al. Emotional Testing on Facebook's User Experience[J]. *IEEE Access*, 8: 58250-58259.
- [105] IQBAL M U, SRINIVASAN B, SRINIVASAN R. Dynamic Assessment of Control Room Operator's Cognitive Workload Using Electroencephalography (EEG)[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2020, 141: 106726.
- [106] CHATTERJEE A, VARTANIAN O. Neuroaesthetics[J]. *Trends in Cognitive Sciences*, 2014, 18(7): 370-375.
- [107] YEH Y C, HSU W C, LI P H. The Modulation of Personal Traits in Neural Responses during the Aesthetic Experience of Mundane Art[J]. *Trends in Neuroscience and Education*, 2018, 10: 8-18.
- [108] HERRERA-ARCOS G, TAMEZ-DUQUE J, ACOSTA-DE-ANDA E Y, et al. Modulation of Neural Activity during Guided Viewing of Visual Art[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2017, 11: 581.
- [109] PUGACH C, LEDER H, GRAHAM D J. How Stable are Human Aesthetic Preferences across the Lifespan? [J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2017, 11: 289.
- [110] FIORI F, PLOW E, RUSCONI M L, et al. Modulation of Corticospinal Excitability during Paintings Viewing: A TMS Study[J]. *Neuropsychologia*, 2020, 149: 107664.
- [111] ZHAO Xue-ru, WANG Jun-jing, LI Jin-hui, et al. The Neural Mechanism of Aesthetic Judgments of Dynamic Landscapes: An fMRI Study[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 20774.
- [112] JACOBS R H A H, CORNELISSEN F W. An Explanation for the Role of the Amygdala in Aesthetic Judgments[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2017, 11: 80.
- [113] CHATTERJEE A. Neuroaesthetics: A Coming of Age Story[J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2011, 23(1): 53-62.
- [114] PELOWSKI M, MARKEY P S, FORSTER M, et al. Move Me, Astonish Me... Delight my Eyes and Brain: The Vienna Integrated Model of Top-down and Bottom-up Processes in Art Perception (VIMAP) and Corresponding Affective, Evaluative, and Neurophysiological Correlates[J]. *Physics of Life Reviews*, 2017, 21: 80-125.
- [115] FINGERHUT J, PRINZ J J. Wonder, Appreciation, and the Value of Art[M]//*Progress in Brain Research*. Amsterdam: Elsevier, 2018: 107-128.
- [116] ETIENNE A, LARROIA T, WEIGLE H, et al. Novel Electrodes for Reliable EEG Recordings on Coarse and Curly Hair[J]. 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), 2020: 6151-6154.
- [117] RADÜNTZ T, MEFFERT B. Cross-Modality Matching for Evaluating User Experience of Emerging Mobile EEG Technology[J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2020, 50(4): 298-305.
- [118] CHEN Min, ZHOU Jun, TAO Guang-ming, et al. Wearable Affective Robot[J]. *IEEE Access*, 6: 64766-64776.
- [119] ARICÒ P, BORGHINI G, DI FLUMERI G, et al. Passive BCI beyond the Lab: Current Trends and Future Directions[J]. *Physiological Measurement*, 2018, 39(8): 08TR02.
- [120] BOCCIA M, BARBETTI S, PICCARDI L, et al. Where does Brain Neural Activation in Aesthetic Responses to Visual Art Occur? Meta-Analytic Evidence from Neuroimaging Studies[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2016, 60: 65-71.
- [121] IIGAYA K, O'DOHERTY J P, STARR G G. Progress and Promise in Neuroaesthetics[J]. *Neuron*, 2020, 108(4): 594-596.
- [122] SKOV M, NADAL M. A Farewell to Art: Aesthetics as a Topic in Psychology and Neuroscience[J]. *Perspectives on Psychological Science*, 2020, 15(3): 630-642.
- [123] GOLNAR-NIK P, FARASHI S, SAFARI M S. The Application of EEG Power for the Prediction and Interpretation of Consumer Decision-Making: A Neuro-marketing Study[J]. *Physiology & Behavior*, 2019, 207: 90-98.
- [124] TRETTEL A, CHERUBINO P, CARTOCCI G, et al. Transparency and Reliability in Neuromarketing Research[M]//*Ethics and Neuromarketing*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 101-111.
- [125] CHERUBINO P, MARTINEZ-LEVY A C, CARATÙ M, et al. Consumer Behaviour through the Eyes of Neurophysiological Measures: State-of-the-Art and Future Trends[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2019, 2019: 1976847.
- [126] 刘洋, 门梦菲, 田蜜, 等. 文创产品的创新设计方法研究[J]. *包装工程*, 2020, 41(14): 288-294.
LIU Yang, MEN Meng-fei, TIAN Mi, et al. Innovative Design Methods of Cultural and Creative Products[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(14): 288-294.
- [127] MAKRANSKY G, TERKILDSEN T S, MAYER R E. Adding Immersive Virtual Reality to a Science Lab Simulation Causes more Presence but less Learning[J]. *Learning and Instruction*, 2019, 60: 225-236.
- [128] ANSADO J, CHASEN C, BOUCHARD S, et al. How

- Brain Imaging Provides Predictive Biomarkers for Therapeutic Success in the Context of Virtual Reality Cognitive Training[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2021, 120: 583-594.
- [129] RAMIREZ-ZAMORA A, GIORDANO J, GUNDUZ A, et al. Proceedings of the Seventh Annual Deep Brain Stimulation Think Tank: Advances in Neurophysiology, Adaptive DBS, Virtual Reality, Neuroethics and Technology[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2020, 14: 54.
- [130] ZHAO Min-rui, GAO Hong-ni, WANG Wei, et al. Research on Human-Computer Interaction Intention Recognition Based on EEG and Eye Movement[J]. *IEEE Access*, 8: 145824-145832.
- [131] WANG Ya-hui, YU Sui-huai, MA Ning, et al. Prediction of Product Design Decision Making: An Investigation of Eye Movements and EEG Features[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2020, 45: 101095.
- [132] 蔡自兴. 中国人工智能 40 年[J]. *科技导报*, 2016, 34(15): 12-32.
CAI Zi-xing. 40 Years of Artificial Intelligence in China[J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34(15): 12-32.
- [133] ROY Y, BANVILLE H, ALBUQUERQUE I, et al. Deep Learning-Based Electroencephalography Analysis: A Systematic Review[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2019, 16(5): 051001.
- [134] RONG-DING H, JUAN-JUAN J. Psychological Structure of Personality and Triune of Brain-Problems, Solutions and Handouts in Teaching of Neuroaesthetics[J]. *Progress in biochemistry and biophysics*. 2020, 47(1): 69-80.
- [135] HALEEM H, WANG Yong, PURI A, et al. Evaluating the Readability of Force Directed Graph Layouts: A Deep Learning Approach[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2019, 39(4): 40-53.
- [136] YU J, ZHAO L. A Novel Deep CNN Method Based on Aesthetic Rule for User Preferential Images Recommendation[J]. *JOURNAL OF APPLIED SCIENCE AND ENGINEERING*. 2021, 24(1): 49-55.
- [137] LOTTE F, BOUGRAIN L, CICHOCKI A, et al. A Review of Classification Algorithms for EEG-Based Brain-Computer Interfaces: A 10 Year Update[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2018, 15(3): 031005.
- [138] TABAR Y R, HALICI U. A Novel Deep Learning Approach for Classification of EEG Motor Imagery Signals[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2017, 14(1): 016003.
- [139] CHEN Yu, CHANG Rui, GUO Ji-feng. Emotion Recognition of EEG Signals Based on the Ensemble Learning Method: AdaBoost[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 8896062.
- [140] KING J L. Summary of Twenty-First Century Great Conversations in Art, Neuroscience and Related Therapeutics[J]. *Frontiers in Psychology*, 2018, 9: 1428.
- [141] SPEE B, ISHIZU T, LEDER H, et al. Neuropsychopharmacological Aesthetics: A Theoretical Consideration of Pharmacological Approaches to Causative Brain Study in Aesthetics and Art[J]. *Progress in Brain Research*, 2018, 237: 343-372.
- [142] ZOTOV A M, KOROLENKO P V, MISHIN A Y, et al. Physical Basics of Neuroaesthetics[J]. *Moscow University Physics Bulletin*, 2019, 74(6): 625-630.
- [143] YADAVA M, KUMAR P, SAINI R, et al. Analysis of EEG Signals and Its Application to Neuromarketing[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, 76(18): 19087-19111.
- [144] ZHENG Pai, WANG Hong-hui, SANG Zhi-qian, et al. Smart Manufacturing Systems for Industry 4.0: Conceptual Framework, Scenarios, and Future Perspectives[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2018, 13(2): 137-150.
- [145] PEPPERELL R. Art, Energy, and the Brain[J]. *Progress in Brain Research*, 2018, 237: 417-435.
- [146] SKOV M, NADAL M. A Farewell to Art: Aesthetics as a Topic in Psychology and Neuroscience[J]. *Perspectives on Psychological Science*, 2020, 15(3): 630-642.
- [147] SUN Mei, HAN Hao-cheng, JIANG Quan-hong. Research on the Application of Neuroaesthetics in Industrial Design[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 892(1): 012076.

责任编辑: 马梦遥