

【工业设计】

基于计算美学的实体界面美度评估方法

李晓英¹, 程帅¹, 周大涛²

(1.湖北工业大学 工业设计学院, 武汉 430068; 2.武汉理工大学 艺术与设计学院, 武汉 430070)

摘要: **目的** 为解决实体界面美度评估中的风格、多维度指标及方法应用问题, 结合计算美学的特性, 提出一个新评估方法。 **方法** 通过分析当前的界面美度评估与计算美学的研究现状和缺口, 提出了运用感性工学、因子分析、平面坐标定位, 美度公式等分析与计量手段来建构一种基于计算美学的实体界面美度评估方法。与已有研究相比, 该方法综合考虑了界面风格认知和多维关联指标等在用户审美要素、评估指标、评估精度和应用效力上的现实问题, 将计算美学的应用对象从现阶段的数字界面拓展到了实体界面。 **结果** 以某品牌示波器的界面设计方案为例, 对新的评估方法进行了实证分析, 并通过眼动追踪实验验证了实证结果, 结果表明, 该评估方法能够准确、有效地反映用户的审美倾向。 **结论** 形成的方法和结论对实体界面美学的设计与评估具有一定的指导作用, 也为计算机辅助界面设计提供了重要参考。

关键词: 实体界面; 美度评估; 计算美学; 因子分析; 眼动追踪

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)14-0041-11

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.14.004

Evaluation Method of Physical Interface Aesthetics Based on Computational Aesthetics

LI Xiao-ying¹, CHENG Shuai¹, ZHOU Da-tao²

(1.School of Industrial Design, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;

2.School of Art and Design, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a novel evaluation method combined with the features of computational aesthetics to solve the problems of style, multidimensional indicators and method application in evaluation of physical interface aesthetics. By analyzing the current research status and gaps of interface aesthetics evaluation and computational aesthetics, an evaluation method of physical interface aesthetics based on computational aesthetics was put forward by Kansei engineering, factor analysis, planar coordinate positioning, aesthetic equation, etc. Differing from prior research, this method accounted for practical issues of perceptions of interface styles and multidimensional correlation indicators in user aesthetic elements, evaluation indicators, evaluation accuracy, and application validity and broadened the application of computational aesthetics from digital interfaces to physical interfaces. The interface design of a specific brand of oscilloscope was used as a case study for an empirical analysis of the novel evaluation method. The empirical results were validated by eye-tracking experiments, which demonstrated that the proposed method could accurately and effectively reflect users' aesthetic preferences. The formulated method and derived conclusions provide valuable guidance for the design and evaluation of physical interface aesthetics and serve as an instrumental reference for computer-aided interface design.

KEY WORDS: physical interface; aesthetics evaluation; computational aesthetics; factor analysis; eye-tracking

人机界面是人与系统进行直接交互的媒介,按照交互媒介的自身属性,可以分为软件界面和硬件界面^[1]。

其中,软件界面是指用户通过数字图形与系统发生交互的数字界面(Digital User Interface, DUI),如系统

收稿日期: 2023-02-15

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金(18YJAZH048)

作者简介: 李晓英(1973—),女,教授,硕士。主要研究方向为智能设计和人机交互。

通信作者: 程帅(1992—),男,硕士生,主攻计算化设计。

界面、APP、Web 等以数字图形为载体的虚拟控件界面；硬件界面是指用户通过物理触觉媒介进行信息交互的实体界面（Tangible User Interface, TUI），如仪器仪表的操作面板、家用电器的功能面板或者交通工具、特种装备的按钮界面等以可触实体为载体的物理显控界面。随着技术的发展，虽然软件数字界面因其多样化、多层次的视觉效果和信息层级，逐渐成为人机界面的主流媒介，但相较于软件数字界面提供的单向视觉反馈，硬件实体界面则兼具了触觉的双向交互特征（既可以传递信息，也可以获取信息），这有利于降低人的注意力负荷，从而增强人机协作、盲操或精细操作的可用性。基于这一优势，实体界面在相关的生产和生活中具有必然的不可替代性^[2]，对其开展设计研究具有重要的实际意义。

目前，在实体界面的研究中，美度评估作为提升实体界面感知可用性的必要方式，研究如何对其进行有效度量成为一个亟待解决的现实问题。具体而言，一方面实体界面的布局元素一般包括按键、旋钮、LED、屏幕等物理组件，这些组件是辅助用户进行信息交流的载体，其布局设计的合理性不仅会影响人机工学的绩效性能，也会直接影响用户的视觉感受和认知理解^[3]；另外，虽然实体界面评估多数集中在注意力负荷、错误率、任务绩效和操作视域等认知绩效方面^[4]，但是随着感性工学的发展，相关实验研究也证明了产品功能可用（理性）与人机界面美感（感性）之间的强关联性^[5]，“美的设计同时也是好用的”^[6]这一涉及审美体验的设计论断也得到了诸多学者的关注。究其原因，美观的界面设计能够有效地降低感知复杂性，提高用户的使用愉悦度，并最终增强产品的可用性，由此，美感设计、美度评估作为推动感性设计的重要手段必然成为界面设计的研究要点^[7]。然而，相较于独立地评估 APP、Web 等数字界面的美度质量，实体界面则经常会与产品的其他部件整合到一起，其很少被作为一种单独的设计要点而获得专门的美度量度。然而从用户的认知偏好、审美需求和体验上看，缺少或忽略对实体界面美度的评估不利于提升人机交互的可用性，也降低了产品的市场竞争力。

针对上述问题，本研究提出了一种基于计算美学的实体界面布局美度评估方法。该方法综合考虑了实体界面美度评估在量化、客观、快速和准确等方面的现实问题，并以某品牌的示波器界面设计为例进行了实证研究，且通过眼动追踪实验验证了该方法的有效性。研究表明，在感性设计成为影响用户使用意愿的背景下，本研究所形成的方法和结论为实体界面美度评估提供了新思路，这对拓展和提升计算美学在实体界面美度评估中的应用方法和质量具有重要价值，也为同类实体界面的美度评估提供了风格特征、审美要素和评估指标等方面的研究参考。

1 界面美度评估与计算美学概述

界面美度评估容易受到个体感性差异的影响，而基于个体经验的主观评估方法在时间周期、成本投入和度量结果的可靠性上存在一定的应用局限。具体而言，美学（Aesthetic）在艺术哲学中被定义为“认知与感官体验模式的结合”^[8]，是一种研究美、丑等审美范畴和人的审美意识、美感经验，以及如何进行美的创造、发展及探究其影响规律的科学。基于这一定义可知：一方面，界面美度评估就是度量界面元素布局的视觉特征是否符合，以及在多大程度上符合用户的感性意象；另一方面，不同用户对美度的感知会受年龄、性别、文化和知识、经验等个体差异的影响。由此可知，与人机工学中标准化和规范化的设计评估相比，界面美度评估则表现出明显的主观性和不确定性^[9]，对此，为了度量界面设计是否达到了较好的美度，现有研究提出了很多方法。其中，多数研究采用问卷调查、用户访谈和观察、专家评估或生理监测等基于个体经验的评估方法，虽然该类方法通过对一定数量的代表用户进行抽样调查，能够获得相对有效的界面美度评估结果，但是在该类方法的整个评估周期中所需的人力成本、时间成本等会随着样本量（用户、评估对象）和评估次数的增加而上升，且这种依赖于主观经验的评估方法，很容易受到个体感性差异的影响，进而导致界面美度的度量结果出现偏差^[10]。

相较于基于个体主观经验的界面美度评估方法，另一项研究工作则试图通过发展计算模型来进行界面美度的客观评估^[11-12]，即计算美学。作为科学与艺术的桥梁^[13]，计算美学具有客观、量化、标准及能够被集成到界面开发环境而实现快速和自动评估的优势，因而，计算美学逐渐成为一门新兴的交叉学科，受到了界面美度评估研究的关注。该类研究的重点是通过美度公式或算法建立界面布局特征（元素布局参数）与用户视觉美感（界面评估指标）的映射关系，旨在客观和标准化地度量用户的主观审美感受。这其中，所采用或建构的美度公式多数由基于视觉认知原理的数学公式所组成，代表性研究是：Birkhoff 提出的美度计算公式“ $M = O / C$ ”，其中， M （Measure）表示美度， O （Order）表示秩序度， C （Complexity）表示复杂度；还有 Ngo 等^[14]针对人的视觉审美偏好建立了 13 个用于量化计算机界面布局美度的计算公式；以及周蕾等^[15]在 Ngo 的基础上提出的 12 个界面美度指标的计算体系，以及开发的界面美度计算原型系统。除这些美度公式之外，随着人工智能技术的发展，基于深度学习的计算美学算法也开始受到关注^[16]，其目的是使用计算机来模拟人的视觉审美思维，以辅助设计师进行界面美度评估，但该类方法的实施需要进行大量的样本学习才能获得有效的评估精度，因此，在现阶段该类方法的研究成果还不能用于指导实际设计。

综合来看, 基于美度公式的计算美学能够实现量化、客观和快速的美度评估, 但为了进一步提升对实体界面度量的准确性, 该类评估方法还需解决风格认知影响、多维指标关联和方法适用性等实际应用问题。具体而言, 在选定美度指标时, 基于计算美学的界面美度评估并没有考虑界面风格定位对用户审美偏好的影响, 因而在有些情况下, 难以合理地解释所选定的度量对象、评估指标及获得的美度结果。这主要是由于美具有不同的风格类型, 且风格美能够影响用户的审美思维方式和认知经验^[17], 因此, 评估具体风格下的界面美度, 既是实体界面美度评估的实际应用需求, 也是保证评估结果可靠性的必要手段。另外, 在当前的界面美度评估过程中, 由于缺少判断和区分评估指标的有效性, 所以会存在无效或重叠评估的问题, 这主要是因为受用户审美认知的多样性和独创性的影响, 根据个体经验所建立的界面美度指标体系往往会有较多的维度, 且多数指标间存在潜在的相关性, 过多的指标维度不仅增加了评估的复杂性, 也会影响到评估精度。再者, 基于计算美学的界面美度评估方法的研究与应用对象主要是数字界面, 对计算美学能否及怎样适用于实体界面的美度评估还缺少相关的研究和应用。

2 实体界面美度评估方法

针对上述问题, 本研究综合界面风格认知和多维关联指标的影响, 提出了一种基于计算美学的实体界面美度评估方法。该方法的评估思路为, 首先, 采用感性工学来明确实体界面的风格认知与审美要素(按键的面积、位置、颜色等) 的相关关系, 以及采用因

子分析对多维评估指标体系进行关联性分析, 旨在为后续的计算美学评估提供有效的度量对象; 其次, 使用二维平面坐标系对实体界面元素的参数信息(按键的面积大小、相对位置等) 进行表征和编码, 旨在为相关的美度公式提供所需的计量数据; 最后, 结合相关评估指标下的美度公式对实体界面的美度进行计算, 以获得客观、有效的度量结果。如图 1 所示, 该方法的具体实施步骤如下。

步骤 1, 界面风格的美度指标分析。首先, 在获得实体界面的典型样本后, 采用品牌文化定位、问卷调查或访谈的方式对典型样本的界面风格和审美要素的具体内容进行梳理和分析(注意, 要结合产品的整体情况来调研界面的风格特征和审美要素), 同时, 使用李克特 7 级量表来量化界面风格与审美要素之间的相关关系, 并选择关联度排名靠前的审美要素作为度量对象; 其次, 结合专家建议 and 用户反馈对相关界面风格和审美要素下的美度评估指标体系进行建构; 最后, 使用因子分析对多维美度评估指标体系的关键因子(关键评估指标) 进行提取, 并计算关键评估指标的权重大小, 以及释义其主要的计量内容。

步骤 2, 界面元素的二维信息编码。相较于数字界面以多个图标层级进行显示的方式, 实体界面的布局元素则是以各种具象的形态(按键、旋钮、显示窗等) 全部呈现在固定的操作面板上。据此, 为便于后续美度公式的计量分析, 可以通过二维平面坐标系对实体界面元素的参数信息进行表征和编码, 如, 使用元素的长和宽的乘积来表征其面积大小, 选择元素的横坐标(x 轴) 和纵坐标大小(y 轴) 来编码其位置参数等, 旨在为相关美度公式的计量运算提供数据支撑。

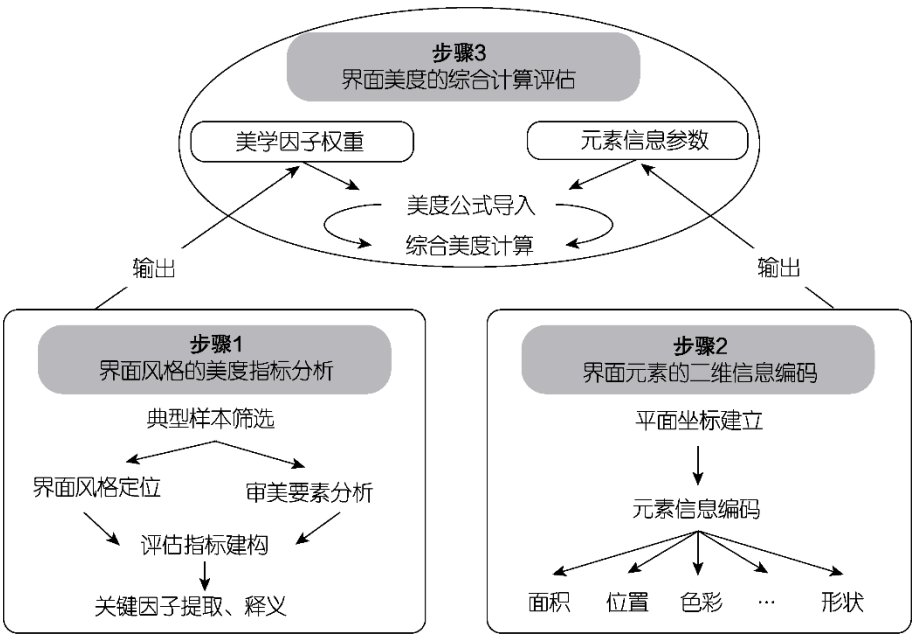


图 1 实体界面的美度评估方法
Fig.1 Aesthetics evaluation method for physical interface

步骤 3, 界面美度的综合计算评估。为了便于比较不同实体界面设计方案的美度水平, 首先, 针对步骤 1 中对关键评估指标的计量释义, 在相关研究理论和方法的基础上, 选择或建构适用于关键评估指标计量的美度公式; 其次, 依据美度公式的计量内容, 分别输入步骤 1 和步骤 2 中界面元素的参数信息和关键评估指标的权重大小, 以获得各个设计方案的综合美度, 并据此结果对界面设计方案进行优选或优化。

最后需要说明的是, 在上述方法的基础上, 当产品品类较多或对相似类型的实体界面美度进行多次评估时, 可将该方法分为两个阶段: 第一阶段是构建出一个涵盖品牌文化和产品定位的实体界面美度指标数据库, 旨在避免重复地分析“界面风格、审美要素和美度指标分析”; 第二阶段是构建出一个针对美度评估指标的算法公式库, 旨在快速地调用相关的美度公式或算法进行指标计量。

3 案例实证分析

以某品牌示波器的实体界面美度评估为例, 本节报告了其在美度指标分析、二维信息编码和综合计算评估 3 个操作步骤中的过程和结果。

3.1 实体界面风格的美度指标分析

依步骤 1 所述, 为了充分考虑实体界面风格认知对审美要素和评估指标的影响, 结合感性工学的相关研究方法来定位和建构了示波器操作界面的美学风格、审美要素和评估指标之间的相关关系, 并通过因子分析提取关键的评估指标。

3.1.1 感性风格定位和审美要素分析

首先, 以 26 个具有代表性的示波器实物图片为调研对象 (见图 2), 在收集和分析了该类产品的品牌文化、设计定位和用户评论 (227 条售后评论) 后, 最终选择了精密、高端、科技、工业、稳重和简洁 6 类界面设计风格, 以及面积、位置、字体、字号、色彩、形状、纹理和质感 8 种视觉审美要素; 然后, 采

用简单随机抽样的方式获取了一个 140 人的调研样本, 其中 103 人 (回复率 73.6%, 男性 87 名, 女性 16 名, 平均年龄 28.90 岁, 标准差为 4.15, 均有表示了解或使用过示波器) 通过李克特 7 级量表评价了示波器操作界面的 6 种界面风格与 8 种审美要素之间的相关程度, 具体结果见表 3。

由图 3 可知, Kendall 协调系数在 0.01 水平上显著, 且数值均在大于 0.5, 表明所有参与人员对界面风格与审美要素相关性的评价具有较好的一致性, 调研数据可信; 在 6 类界面风格中, 精密风格具有最大的权重为 0.35, 其次是工业风格为 0.20, 这表明用户对此类示波器操作界面的风格预期倾向于具有协调一致、比例均衡和布局规整等特点的界面设计, 因此选择“精密”和“工业”风格作为该类示波器的主题风格进行分析; 另外, 由表 1 中单元格的顏色变化 (顏色越深, 越相关) 可知, 精密、工业和科技等界面风格均表现出了与面积、位置两类审美要素的强相关关系, 这说明界面元素的面积和位置的布局特征, 最有效地描述和预测用户对界面风格的认知特点, 是精密、工业等界面风格特征下最为关键的审美要素, 因此选择“面积和位置”两种审美要素作为评估示波器界面美度的度量对象。

3.1.2 评估指标建构和关键因子提取

依据上述分析结果, 组织 2 名产品设计师 (均在工业设计行业从业 3 年) 对用户评论信息进行了分析、判断和补充, 最终提出了对称感、密集感、同一感、整齐感、节奏感、平衡感、呼应感、优先感、规律感、连续感、均衡感、紧凑感等 12 个感性词汇作为该类实体界面的美度评估指标。为了进一步判断和区分 12 个评估指标间的相关性、有效性和权重次序以提升评估精度, 采用简单随机抽样的方式对 133 人 (男性 96 名, 女性 37 名, 平均 23.77 岁, 标准差为 2.59) 进行了问卷调查, 调研对象使用李克特 7 级量表对 12 个美度评估指标与示波器美度风格之间的关联程度进行了打分, 随后, 使用 SPSS 因子分析计量了 133 条打分数据, 结果见表 1。



图 2 示波器操作面板的实物照片 (部分)

Fig.2 Photograph of the oscilloscope operation panel (part)

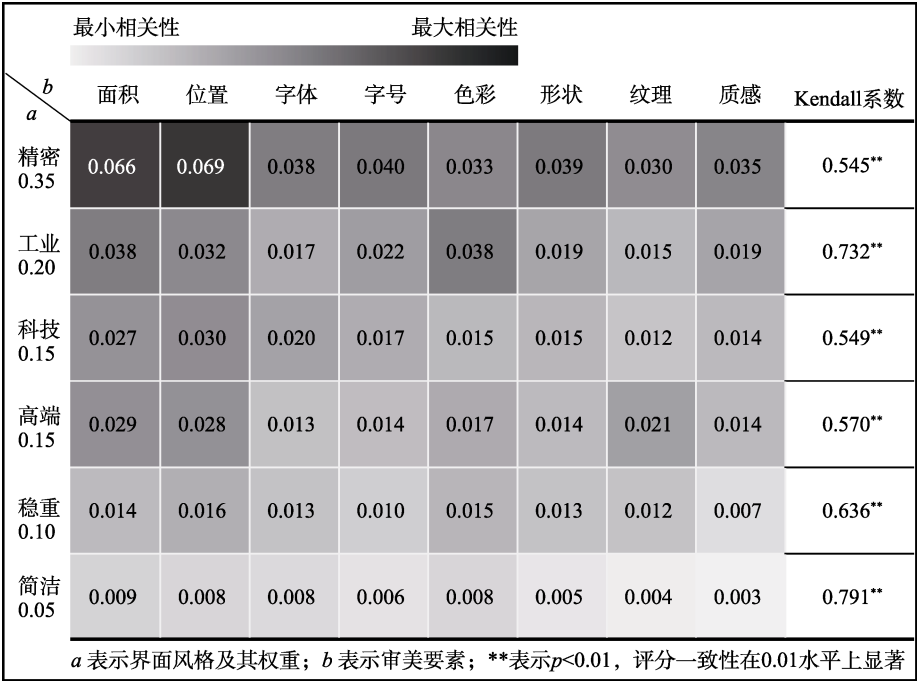


图 3 示波器的界面风格与审美要素的相关性
Fig.3 Correlation between interface style and aesthetic elements of oscilloscope

表 1 12 个美学评估指标的因子分析结果
Tab.1 Results from the factor analysis of twelve aesthetics evaluation indicators

美学关键因子	美学指标	共同度	初始特征根	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
因子 1 协调感 (EM)	对称感	0.929	4.225	20.536	35.210
	整齐感	0.881			
	平衡感	0.888			
	均衡感	0.859			
因子 2 比例感 (PM)	同一感	0.743	2.464	15.350	55.746
	节奏感	0.734			
	呼应感	0.725			
	规律感	0.731			
因子 3 次序感 (SM)	优先感	0.936	1.842	10.717	81.813
	连续感	0.929			
因子 4 整体感 (UM)	密集感	0.741	1.286	0.000	0.000
	紧凑感	0.721			

注: Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)度量值为 0.792; Bartlett 球形度检验的显著性水平 $P: 0.000$ 。

由表 1 可知, KMO 检验统计量在 0.7 以上, 且 Bartlett 球形检验的显著性水平 P 小于 0.05, 这表明 12 个美学指标之间存在显著的相关性, 因子分析的结果有效; 同时, 12 个美学指标的共同度均大于 0.4, 表示 12 个美学指标均具有解释意义; 通过因子分析共提取出协调感、比例感、次序感和整体感 4 个美学关键因子 (又称: 关键美学指标), 其累积方差贡献率为 81.813%, 这表明 4 个关键因子包含了 12 个美学指标的大部分信息, 能够用于解释和度量示波器界面的美学; 进而以各个因子的方差贡献率与总的累积方差贡献率的比率作为权重, 用以提升对示波器实体界面美度的综合评估精度, 协调感、比例感、次序感和整体感 4 个关键因子的权重依次大小, 见式 (1)。

$$\omega_n^* = (0.430, 0.251, 0.188, 0.131) \tag{1}$$

结合相关研究^[14-15]的定义, 对上述 4 个美学关键因子的释义如下。

1) 协调感 (Equilibrium Measure, EM) 主要度量各个界面元素在界面框架 (把所有界面元素包含在内的最大矩形) 上的视觉重心偏差度。参考物理学中的“力矩平衡”理论, 可知界面元素的面积和离心距离是影响用户视觉协调的关键因素, 对称、整齐、平衡和均衡的界面布局才能够营造出令人舒适的协调美感。

2) 比例感 (Proportion Measure, PM) 主要度量

界面元素的长宽比值与审美经验中的美感比值的相似度。对生活中的日常事物，人们总是习惯地寻求比例关系，比如，设计中的“黄金美学比例”（如 1：1，1：2，1：1.414，1：1.732，1：1.618），可以认为符合比例美感的界面元素越多，或彼此之间的审美关联度越强，则界面美感越高。

3) 次序感（Sequence Measure，SM）主要度量界面元素的布局顺序与视觉搜索规律的匹配程度。研究表明，界面元素的布局设计存在明显的优势效应^[18]，譬如人眼存在从左往右、自上而下及从大到小的视觉检索习惯，符合这种视觉规律的界面布局不仅能够提升视觉认知效率和准确度，而且也能够有效地提高用户的审美感知质量。

4) 整体感（Unity Measure，UM）主要度量界面元素、界面布局（把所有界面元素包含在内的最小矩形）与界面框架之间在面积占比上的一致程度。在同一个界面框架范围内，界面布局的面积一定时，界面元素的面积越大就越拥挤，整体感越低；界面元素的面积一定时，界面元素的排列越松散，界面布局所占的空间就越大，整体感越低；对此，相关研究表明^[19]，界面元素与界面布局的面积比要近似等于界面布局与界面框架的面积比，才能使界面设计具有较好的整体感。

3.2 实体界面元素的二维信息编码

依步骤 2 所述，采用二维平面坐标系表征和编码了 4 个示波器界面的设计方案（见图 4，左列是设计方案，右列是对应的表征和编码方式）的元素面积和位置参数。具体操作中，采用外切矩形的方式来定位界面设计方案中界面元素、界面布局和界面框架的空间信息。这其中，界面元素表征（object）被定义为设计表征方案中的单个外切矩形（见图 4 右列的各个黑色单元，其参数信息见表 2）；界面布局表征（layout）被定义为设计表征方案中将所有界面元素包含在内的最小矩形（见图 4 右列的虚线框，其参数信息见表 2）；界面框架表征（frame）被定义为设计表征方案中将所有界面元素包含在内的最大外切矩形（见图 4 右列的实线框，其长宽尺寸为 360 mm×120 mm）；同时，将这一最大外切矩形的左上角顶点设定为二维坐标平面的原点（0，0），定义 x 轴的正方向为自左向右，y 轴的正方向为自上向下，W 为外切矩形的宽度，H 为外切矩形的高度。以各个外切矩形的 x 坐标、y 坐标、W 宽度和 H 高度为参数，计量了 4 个界面设计方案中界面元素和界面布局的位置及面积参数，具体结果见表 2。

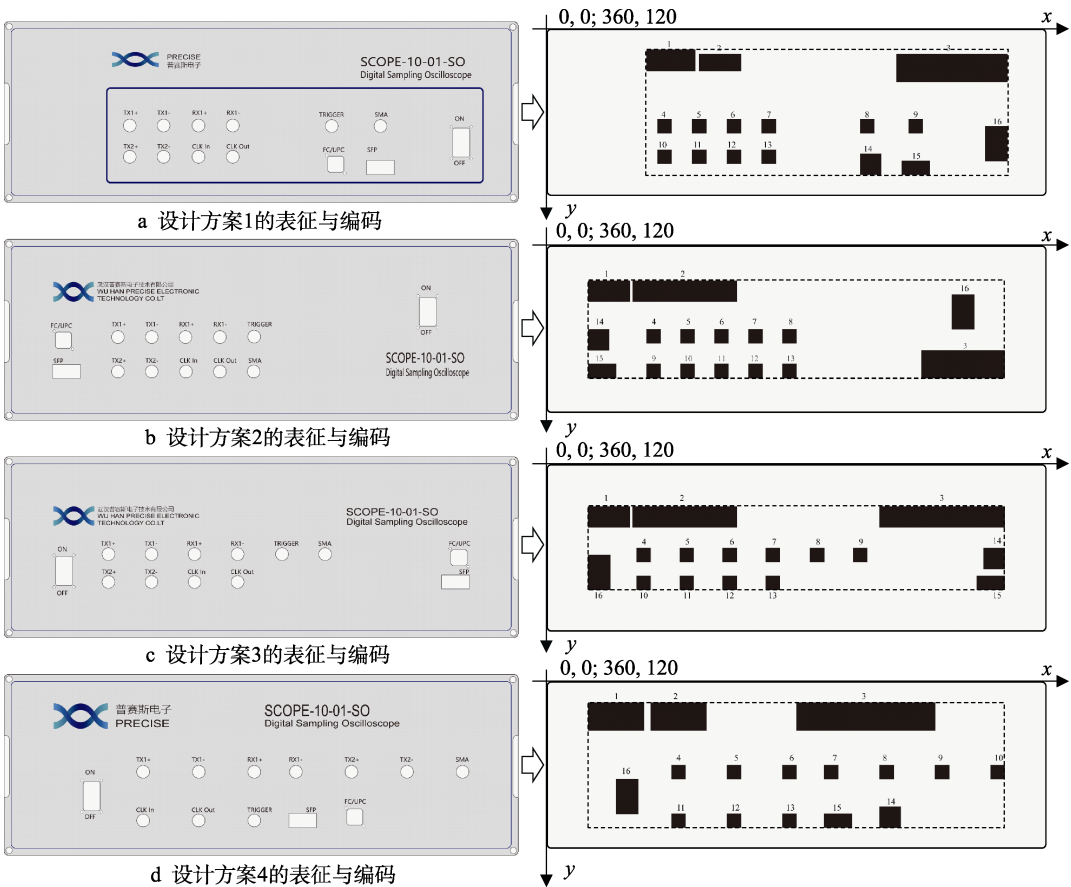


图 4 4 个示波器界面设计方案的表征和编码方式
Fig.4 Representation and encoding strategies for the four oscilloscope interface design solutions

表 2 4 个设计方案中界面元素的二维编码参数
Tab.2 Parameters utilized for two-dimensional coding of interface elements in four design solutions

元素	方案 1 (布局 layout: 260 mm × 90 mm)				方案 2 (布局 layout: 300 mm × 70 mm)			
	x	y	W _{object} /mm	H _{object} /mm	x	y	W _{object} /mm	H _{object} /mm
1	72.0	15.0	35.0	15.0	30.0	25.0	30.0	15.0
2	110.0	18.0	30.0	12.0	62.0	25.0	75.0	15.0
3	252.0	18.0	80.0	20.0	270.0	75.0	60.0	20.0
4	80.0	65.0	10.0	10.0	72.0	60.0	10.0	10.0
5	105.0	65.0	10.0	10.0	96.5	60.0	10.0	10.0
6	130.0	65.0	10.0	10.0	121.0	60.0	10.0	10.0
7	155.0	65.0	10.0	10.0	145.5	60.0	10.0	10.0
8	226.0	65.0	10.0	10.0	170.0	60.0	10.0	10.0
9	261.0	65.0	10.0	10.0	72.0	85.0	10.0	10.0
10	80.0	87.0	10.0	10.0	96.5	85.0	10.0	10.0
11	105.0	87.0	10.0	10.0	121.0	85.0	10.0	10.0
12	130.0	87.0	10.0	10.0	145.5	85.0	10.0	10.0
13	155.0	87.0	10.0	10.0	170.0	85.0	10.0	10.0
14	226.0	90.0	15.0	15.0	30.0	60.0	15.0	15.0
15	256.0	95.0	20.0	10.0	30.0	85.0	20.0	10.0
16	316.0	70.0	16.0	25.0	292.0	35.0	16.0	25.0

元素	方案 3 (布局 layout: 300 mm × 60 mm)				方案 4 (布局 layout: 300 mm × 90 mm)			
	x	y	W _{object} /mm	H _{object} /mm	x	y	W _{object} /mm	H _{object} /mm
1	30.0	30.0	30.0	15.0	30.0	15.0	40.0	20.0
2	65.0	30.0	75.0	15.0	75.0	15.0	40.0	20.0
3	240.0	30.0	90.0	15.0	180.0	15.0	100.0	20.0
4	65.0	60.0	10.0	10.0	90.0	60.0	10.0	10.0
5	96.0	60.0	10.0	10.0	130.0	60.0	10.0	10.0
6	127.0	60.0	10.0	10.0	170.0	60.0	10.0	10.0
7	158.0	60.0	10.0	10.0	200.0	60.0	10.0	10.0
8	190.0	60.0	10.0	10.0	240.0	60.0	10.0	10.0
9	221.0	60.0	10.0	10.0	280.0	60.0	10.0	10.0
10	65.0	80.0	10.0	10.0	320.0	60.0	10.0	10.0
11	96.0	80.0	10.0	10.0	90.0	95.0	10.0	10.0
12	127.0	80.0	10.0	10.0	130.0	95.0	10.0	10.0
13	158.0	80.0	10.0	10.0	170.0	95.0	10.0	10.0
14	315.0	60.0	15.0	15.0	240.0	90.0	15.0	15.0
15	310.0	80.0	20.0	10.0	200.0	95.0	20.0	20.0
16	30.0	65.0	16.0	25.0	50.0	70.0	16.0	25.0

3.3 实体界面美度的综合计算评估

依步骤 3 所述,为客观评估 4 个界面设计方案(见图 4 左列) 的界面美学, 结合 Ngo 等^[14]的研究成果, 形成了面向协调感、比例感、次序感和整体感 4 个关键因子(关键评估指标) 的计算美学公式, 具体见表 3。由于 4 个界面设计方案的布局特征较为一致, 依据设计经验, 设定 4 个关键因子得分的适度范围为正向指标, 得分是介于[0, 1]的连续数值, 得分越大越好。

依据表 2—3, 使用 Matlab 分别计算了 4 个界面设计方案(见图 4 左列) 在协调感 EM、比例感 PM、次序感 SM、整体感 UM 上的美学值, 并结合式(1) 中 4 个关键因子的权重大小计量了各个设计方案的综合美学(加权后的界面美学), 结果见表 4。4 个界面设计方案的综合美学排序为方案 3>方案 4>方案 2>方案 1, 其中: 在 4 个设计方案中, 方案 3 在次序感、整体感两个评估指标上表现最高, 说明其设计符合用户视觉搜索优势, 且具有紧凑的布局特征; 其次, 方案 4 的次序感也表现最高, 但其整体感最低, 说明其

表 3 4 个美学关键因子的计算美度公式
Tab.3 Computational aesthetics equation based on the four key aesthetics factors

美学关键因子	含义解释	计算美度公式说明
协调感 (EM)	协调感的美度公式主要是用于计算所有界面元素的中心坐标与界面框架的中心坐标之间的偏差度	$A_{EM} = 1 - \frac{ A_{EM}^x + A_{EM}^y }{2}; A_{EM}^x = \frac{2 \sum_i^n a_i (x_{object}^i - x_{frame})}{W_{frame} \sum_i^n a_i}; A_{EM}^y = \frac{2 \sum_i^n a_i (y_{object}^i - y_{frame})}{H_{frame} \sum_i^n a_i}$ $x_{object}^i = x_i + \frac{W_i}{2}; y_{object}^i = y_i + \frac{H_i}{2}; 0 \leq x_i - x_c \leq \frac{W_{frame}}{2}; 0 \leq y_i - y_c \leq \frac{H_{frame}}{2}$ 式中: A_{EM} 为界面协调感的美度值; A_{EM}^x 为界面元素的中心坐标与界面框架的中心坐标在 x 轴上的偏差度; A_{EM}^y 为界面元素的中心坐标与界面框架的中心坐标在 y 轴上的偏差度; $(x_{object}^i, y_{object}^i)$ 和 (x_{frame}, y_{frame}) 分别为界面元素和界面框架的中心坐标; a_i 为界面元素的面积; (x_i, y_i) 为表 2 中界面元素 i 的坐标参数; W_i 和 H_i 为界面元素的宽度和高度; W_{frame} 和 H_{frame} 为界面框架的宽度和高度; n 为界面元素的个数。
比例感 (PM)	比例感的美度公式主要是用于计算各个界面元素和布局的宽高比值与常用美度比例之间的相似度	$A_{PM} = \frac{ P_{PR-object} + P_{PR-layout} }{2}; \begin{cases} P_{PR-object} = \frac{\sum_i^n (1 - 2 \min p_j - p_i)}{n} \\ P_{PR-layout} = 1 - 2 \min p_j - p_{layout} \end{cases}$ $\begin{cases} p_i = \min \left(\frac{H_i}{W_i}, \frac{W_i}{H_i} \right) \\ p_{layout} = \min \left(\frac{H_{layout}}{W_{layout}}, \frac{W_{layout}}{H_{layout}} \right) \end{cases}; P_j = \{1, 1.414, 1.732, 1.618, 2\}$ 式中: A_{PM} 为界面比例感的美度值; $P_{PR-object}$ 为界面元素的宽高比值与常用美度比例之间的综合相似度; $P_{PR-layout}$ 为界面布局的宽高比值与常用美度比例之间的综合相似度; p_i 为界面元素的最小宽高比值; p_{layout} 为界面布局的最小宽高比值; p_j 为常用美度比例; W_i 和 H_i 分别为界面元素的宽度和高度; W_{layout} 和 H_{layout} 分别为界面布局的宽度和高度。
次序感 (SM)	次序感的美度公式主要是用来计算界面元素在布局空间中的实际视觉搜索优势与最优视觉布局优势 (即最为符合人类视觉搜索习惯的) 之间的差异度	$A_{SM} = 1 - \frac{\sum_j q_j - K_j }{8}; K_j = \begin{cases} 4 & \text{if } \omega_j \text{ is the 1st biggest in } \omega \\ 3 & \text{if } \omega_j \text{ is the 2nd biggest in } \omega \\ 2 & \text{if } \omega_j \text{ is the 3rd biggest in } \omega \\ 1 & \text{if } \omega_j \text{ is the 4th biggest in } \omega \end{cases}$ $j = \text{LU, RU, LL, RL}; \{q_{LU}, q_{RU}, q_{LL}, q_{RL}\} = \{4, 3, 2, 1\}$ $\omega_j = q_j \sum_i^n a_{ij}, \omega = \{\omega_{LU}, \omega_{RU}, \omega_{LL}, \omega_{RL}\}$ 式中: A_{SM} 为界面次序感的美度值; LU、RU、LL、RL 为界面布局的 4 个象限 (左上、右上、左下、右下); q_j 为标定的人类视觉搜索规律在 4 个象限中的权重; K_j 为实际的界面元素在 4 个象限中的视觉搜索权重; ω_j 为界面元素在某一象限中的视觉优势度; ω 为界面元素在 4 个象限中的视觉优势度集合; a_{ij} 为界面元素 i 在 4 个界面象限 j 上的面积。
整体感 (UM)	整体感的美度公式主要是用于计算界面元素、界面布局和界面框架之间的面积占比的相似度, 进而计算整体界面布局的紧凑度	$A_{UM} = \begin{cases} P_{object-layout} / P_{layout-frame}, & P_{object-layout} < P_{layout-frame} \\ P_{layout-frame} / P_{object-layout}, & P_{object-layout} \geq P_{layout-frame} \end{cases};$ $\begin{cases} P_{object-layout} = \sum_i^n a_i / a_{layout} \\ P_{layout-frame} = a_{layout} / a_{frame} \end{cases}$ 式中: A_{UM} 为界面整体感的美度值; $P_{object-layout}$ 为界面元素与界面布局的面积比值; $P_{layout-frame}$ 为界面布局与界面框架的面积比值; a_i 为界面元素的面积; a_{layout} 为界面布局面积; a_{frame} 为界面框架面积; n 为界面元素的个数。

注: 界面元素 (object) 被定义为设计表征方案中的单个矩形; 界面布局 (layout) 被定义为设计表征方案中将所有界面元素包含在内的最小外切矩形; 界面框架 (frame) 被定义为设计表征方案中将所有界面元素包含在内的最大外切矩形。

表 4 4 个设计方案的综合美学
Tab.4 Overall aesthetics quality of the four design solutions

美学关键因子	ω_n^*	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
协调感 EM	0.430	0.816	0.943	0.904	0.846
比例感 PM	0.251	0.818	0.703	0.659	0.780
次序感 SM	0.188	0.750	0.625	1.000	1.000
整体感 UM	0.131	0.340	0.451	0.633	0.333
综合美学	1	0.742	0.759		0.791

界面元素的布局较为分散;而方案 2 在协调感表现最好,其视觉重心最为平衡;方案 1 在比例感上表现最高,其界面元素和布局比例感最为突出。

4 结果验证与讨论

为了检验上述研究结果的有效性,本研究采用眼动追踪实验重新评估了 4 个界面设计方案的美度排序,并通过对比和分析两次评估结果的一致点和差异点,讨论了研究方法的优势和不足。

4.1 验证实验设计与分析

1) 准备刺激材料。为方便被试者能够直观地对比各个界面设计方案的美度差异,将 4 个界面设计方案进行了组合,并将组合方案作为眼动实验的刺激材料。同时,考虑到视觉搜索效应对眼动测试结果的影响,采用了简单随机抽样的方式从 24 种 (A_4^4) 组合方案中抽取了 4 组随机组合方案作为刺激材料,结果如图 5 所示,且每组刺激材料可以划分为 AOI_1 (方案 1)、AOI_2 (方案 2)、AOI_3 (方案 3) 和 AOI_4 (方案 4) 4 个兴趣区 (Areas of Interest, AOI)。

2) 选择实验被试者。参考典型的专家主观评估过程,招募了具有示波器使用或设计经验的 11 名专家被试者 (设计师 3 名,从业人员 8 名,平均年龄 28.36 岁,SD 值为 4.65)。

3) 设定实验任务。为了避免被试者因疑惑、好奇或无目的浏览而造成个别 AOI 内的注视点过高(假性注视)或者趋于均值(无目的注视),将实验任务设定为“对 4 个界面设计方案进行美学优选”,并采用了随机播放的方式(间隔时间为 15 s)将 4 组刺激材料进行展示,以避免学习效应对实验结果的影响。

4) 设计实验过程。在经过实验说明和一次预实验之后,使用可穿戴眼动仪 (Tobii Pro Glasses 2) 采集了 11 名被试者的眼动数据。并在实验结束后对参与实验的 11 名专家被试者进行了面对面访谈,以及邀请其使用李克特 7 级量表对 4 个示波器设计方案的美度进行综合打分,用以为后续的眼动数据分析提供参考。

5) 分析实验结果。使用 ErgoLAB3.0 对其中 10 名专家被试者 (其中,1 名被试者因头部移动幅度过大而导致数据匹配困难,对其相关数据予以了剔除) 的眼动数据进行叠加分析,获得了由被试者注视次数累积生成的眼动热点图 (见图 5) 和各 AOI 内的平均注视点数量 (见表 5)。

研究表明,眼动热点图通过颜色梯度可以直观地反映界面设计方案对被试者的吸引程度^[20],也就是被试者对界面设计方案的关注度,一般认为红、黄和绿的热点颜色渐变按降序依次表示关注度由高到低。同时,依据实验任务的设定 (对 4 个界面设计方案进行

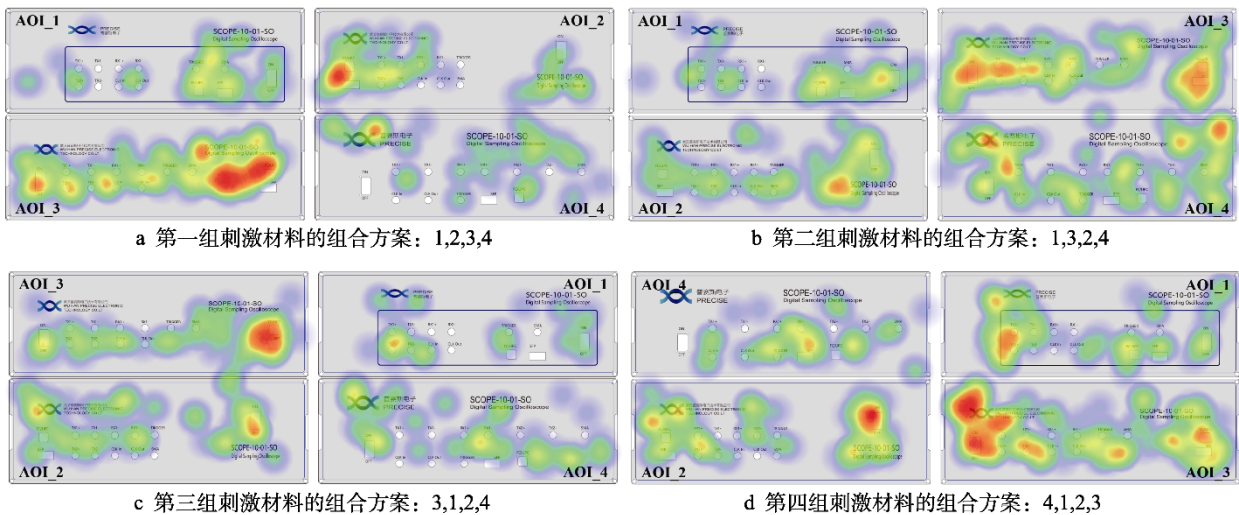


图 5 眼动热点图
Fig.5 Eye-tracking heatmap

表 5 各兴趣区 (AOI) 内的注视点数量
Tab.5 Count of gaze points within each area
of interest (AOI)

组别	AOI_1 (方案 1)	AOI_2 (方案 2)	AOI_3 (方案 3)	AOI_4 (方案 4)
第一组	16.171	23.756	39.932	19.954
第二组	16.270	16.042	34.537	32.692
第三组	13.151	26.804	34.642	25.242
第四组	16.957	22.948	45.421	14.674
均值	15.637	22.388		23.141

注：单元格内的数据为 10 个被试者在各 AOI 内注视点数量的均值

美度优选)、实验后的访谈结果(多次注视某个兴趣区,是否是因为疑惑、好奇或不理解)和相关文献的应用情况^[20-23],在此次实验中设定了被试者对界面设计方案的注视次数越多,界面设计的吸引力就越高,表示界面美度越高。如图 5 所示,整体上可知方案 3 的红色密度最高,其次是方案 2 和方案 4 的颜色密度,方案 1 的红色密度最低,进一步结合实验后的专家综合打分结果(方案 1 是 4.00 分,方案 2 是 5.00 分,方案 3 是 6.18 分,方案 4 是 4.91 分),最终获得的美度排序为,方案 3>方案 2>方法 4>方法 1。将这一结果与基于计算美学的客观评估结果(方案 3>方案 4>方案 2>方案 1)进行对比,可知两次评估的排序结果都认为方案 3 最优和方案 1 最差,但两次评估结果在方案 2 和方案 4 的排序上存在差异。为此,通过统计专家被试者在各个 AOI 兴趣区内的平均注视点数量(见表 5),发现 AOI 4 内的注视点数量(23.141)大于 AOI 2 内的注视点数量(22.388),这表明专家被试者对方案 4 的关注度高于方案 2,进而表明方案 4 的界面美度要高于方案 2,这一评估结果与基于计算美学的评估结果一致。

针对方案 2 和方案 4 在专家综合评分和眼动注视次数两种不同计量方式下的结果差异,组织了 2 名专家复查与分析了实验设计和结果,结果表明:上述差异可能是由眼动实验中专家样本偏少、个体经验不均衡或界面美感近似(相似、低敏感的评估内容会引发主观性的犹豫和模糊评估)等原因而导致的波动误差,这种波动误差普遍存在于基于专家经验的主观评估中,其主要会对得分值较为接近(如方案 2 和方案 4)的结果造成一定程度的影响。

4.2 研究讨论

综上所述,眼动实验的评估结果验证了所述方法的有效性,表明相较于基于专家经验的主观评估,使用美学计算则可避免波动误差对度量结果的影响,更能够准确、有效地反映出用户的审美倾向。具体而言,本研究的评估方法是使用美度公式来评估实体界面,从理论研究上看,这些美度公式主要用于客观地度量

界面元素的参数信息与美度指标之间的相关关系,比如:使用美度公式度量了界面元素中心的视觉偏差情况与协调感的关系、界面元素的长宽比情况与比例感的关系、界面元素的视觉搜索优势情况与次序感的关系及界面元素的面积占比情况与整体感的关系。另外,从实践应用上看,这些相关关系常被作为设计指南用于指导界面的设计和布局,其代表了大众的、普适的和共性的审美特征。可以说,据此建构的美度公式不仅实现了对这种感性关系的标准化度量,而且也去除了极端个体经验对审美结果的影响。因此,与个人主观经验的美度评估相比,采用计算美学的界面美度评估方法能够有效地降低专家样本偏少、个体经验不均衡或界面美感近似等对度量结果的影响。尤其是对相似、相近或差别不敏感的界面设计方案,该评估方法可以实现更加精细的量化评估,更能够准确地反映出用户的实际审美倾向。

最后需要指出的是,在审美综合评价中,美度指标存在适度范围的问题,即美度指标的得分数值既不是越大越好,也不是越小越好,而是应趋于 1 个或多个适度点,这与“美有千姿百态,且各有千秋”的实际情况相吻合^[17]。因此,为了保证综合美度评估的准确性,在应用上述方法对实体界面的美度进行评估时,应该结合设计经验来考虑美度指标得分的适度范围(正向指标、反向指标,或是适度指标)。对布局特征近似的界面设计方案可以考虑依据正向或反向指标进行综合评估,而对布局特征反差较大的界面设计方案则应该考虑使用适度指标进行综合评估,或者通过专家打分对评估结果进行修正。

5 结语

本研究旨在为实体界面的美度评估提供一个可行、有效的量化方法,为此,从界面美度评估的风格认知影响和多维指标关联等实际应用问题出发,提出了基于计算美学的实体界面美度评估方法。从方法和应用的角度上看,提供了以下几个方面的贡献:针对实体界面的布局特点,提出了系统化的界面美度评估方法,将计算美学评估的应用对象从现阶段的数字界面延伸到了实体界面;在评估过程中综合考虑了界面风格对审美要素、审美指标的影响,并采用因子分析来提取美度关键因子和度量其权重大小,有效地提升了实体界面美度评估的应用效力;该评估方法使客观、快速和标准化地开展实体界面美学的设计与评估成为可能,对计算机辅助界面设计的研究应用具有一定的参考价值。

考虑到界面设计中布局元素和形式的多样化,以及用户审美偏好的丰富性和习得性,与之相关的计算美度公式和美度指标的适用范围仍需不断地研究发展,未来有必要在更多研究实践的基础上进一步地改

进该类评估方法。具体而言,现阶段的计算美学研究缺少适用于所有审美要素的计算公式体系或算法模型库,因此仅对与示波器界面风格具有强相关的面积和位置两种审美要素进行了美度评估。进一步的研究将完善和扩展实体界面美度评估的审美要素和指标体系,包括建构面向界面元素形状特征或色彩特征的美度计算公式,以及整合多种审美要素下的评估指标进行量化研究,从而更全面地反映用户对界面美度的审美经验。考虑到“美有千姿百态,且各有千秋”的实际情况,对相关风格特征下美度指标的适度范围进行研究也应成为未来工作的重点。

参考文献:

- [1] 罗仕鉴,朱上上. 服务设计[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
LUO Shi-jian, ZHU Shang-shang. Service Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [2] 米海鹏,王濛,卢秋宇,等. 实物用户界面:起源、发展与研究趋势[J]. 中国科学:信息科学, 2018, 48(4): 390-405.
MI Hai-peng, WANG Meng, LU Qiu-yu, et al. Tangible User Interface: Origins, Development, and Future Trends[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2018, 48(4): 390-405.
- [3] 吕健,孙玮伯,潘伟杰,等. 基于认知特性的信息界面布局美度评价[J]. 包装工程, 2019, 40(18): 220-226.
LYU Jian, SUN Wei-bo, PAN Wei-jie, et al. Evaluation of Information Interface Layout Beauty Based on Cognitive Characteristics[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(18): 220-226.
- [4] 赵欣,丁怡,侯文军,等. 复杂信息系统界面可用性指标体系研究[J]. 图学学报, 2018, 39(4): 716-722.
ZHAO Xin, DING Yi, HOU Wen-jun, et al. On the Usability Evaluation Index System of Complex Information System Interface[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(4): 716-722.
- [5] KAI-CHRISTOPH H, HÜLSMANN J, KAI K. The Interplay Between Usability and Aesthetics: More Evidence for the "What is Usable is Beautiful" Notion[J]. Advances in Human-Computer Interaction, 2014, 2014: 1-13.
- [6] SONDEREGGER A, SAUER J. The Influence of Design Aesthetics in Usability Testing: Effects on User Performance and Perceived Usability[J]. Applied Ergonomics, 2010, 41(3):403-410.
- [7] 张书涛,苏鹏飞,杨文瑾,等. 基于熵理论的产品美度综合评价方法[J]. 包装工程, 2021, 42(8): 79-87.
ZHANG Shu-tao, SU Peng-fei, YANG Wen-jin, et al. Integrated Evaluation Method of Product Aesthetic Based on Entropy Theory[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(8): 79-87.
- [8] FISHWICK P, DIEHL S, PROPHET J, et al. Perspectives on Aesthetic Computing[J]. Leonardo, 2005, 38(2): 133-141.
- [9] MAITY R, BHATTACHARYA S. Is My Interface Beautiful?: A Computational Model-based Approach[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2019, 6(1): 149-161.
- [10] 储程,董占勋. 基于马田系统的人机界面审美偏好智能定位方法[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(10): 2642-2649.
CHU Cheng, DONG Zhan-xun. Intelligent Positioning Method for Aesthetic Preference of User Interface Based on Mahalanobis-Taguchi System[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(10): 2642-2649.
- [11] MAITY R, MADROSIYA A, BHATTACHARYA S. A Computational Model to Predict Aesthetic Quality of Text Elements of GUI[J]. Procedia Computer Science, 2016, 84: 152-159.
- [12] CHETTAOUI N, BOUHLEL M S. I2Evaluator: an Aesthetic Metric-tool for Evaluating the Usability of Adaptive User Interfaces[C]// International Conference on Advanced Intelligent Systems and Informatics. Cham: Springer, 2017: 374-383.
- [13] BO Y, YU J, ZHANG K. Computational Aesthetics and Applications[J]. Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art, 2018, 1(1): 1-19.
- [14] NGO, D C L, TEO L S, BYRNE J G. Modelling Interface Aesthetics[J]. Information Sciences, 2003, 52: 25-46.
- [15] 周蕾,薛澄岐,汤文成,等. 界面元素布局设计的美度评价方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(05): 758-766.
ZHOU Lei, XUE Cheng-qi, TANG Wen-cheng et al. Aesthetic Evaluation Method of Interface Elements Layout Design[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(5): 758-766.
- [16] 周坤,张曦,肖定坤,等. 基于深度学习的界面设计美学评价研究[J]. 包装工程, 2020, 41(12): 207-215.
ZHOU Kun, ZHANG Xi, XIAO Ding Kun, et al. Aesthetic Evaluation of Interface Design Based on Deep Learning[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(12): 207-215.
- [17] 周爱民,周彩霞,欧阳晋焱,等. 基于指标适度标准化的界面风格美综合评价模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(12): 2273-2285.
ZHOU Ai-min, ZHOU Cai-xia, OUYANG Jin-yan, et al. Model of Synthetic Evaluation on Interface Stylistic Beauty Based on Moderately Standardized of Index[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(12): 2273-2285.
- [18] CHEN C H, CHIANG S Y. The Effects of Panel Arrangement on Search Performance[J]. Displays, 2011, 32(5): 254-260.
- [19] 周爱民,苏建宁,阎树田,等. 产品形态审美综合评价的非线性信息动力学模型[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 150-159.

(下转第82页)