

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.08.014

沈洁, 许莉钧. 基于多源数据融合和交互式粒子群优化的船舶舱室内装智能色彩设计研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(8): 150-161.

基于多源数据融合和交互式粒子群优化的 船舶舱室内装智能色彩设计研究

沈洁¹, 许莉钧²

1. 江苏科技大学 机械工程学院, 镇江 江苏 212100; 2. 南京工程学院 艺术与设计学院, 南京 211167

摘要: 色彩在增强船舱吸引力、优化乘客体验方面扮演着至关重要的角色。为了准确有效地评估舱室内装色彩设计与乘客情绪感知之间的联系, 通过整合环境数据、情感需求分析和用户反馈等多源信息, 提出并设计了一种基于沉浸式虚拟现实(Immersive Virtual Reality, IVR)的集成框架。首先, 建立一个包含视觉和谐和人体偏好两种测量方法的优化模型, 用于评估色彩搭配的美学性能。然后, 采用愉悦相关的语言价值赋值方法估计色彩搭配的视觉和谐得分。为了求解该优化模型, 采用了一种基于小群体的交互式粒子群优化(Interactive Particle Swarm Optimization, IPSO)算法, 通过人工判断来考虑情绪对色彩搭配的偏好。原型系统在游戏引擎环境 Unity 3D 中开发, 以头戴式显示设备 HTC Vive 实现, 提供了交互式 and 身临其境的用户体验。最后, 通过整合多源数据在不同的船舱室内场景中用户测试, 验证研究框架。测试结果表明, 该方法可以在舱室场景中自动调整船舱色彩, 使其更加符合乘客的情感需求。

关键词: 多源数据; 舱室内装; 色彩设计; 情绪匹配; 沉浸式虚拟现实; 交互式粒子群优化

中图分类号: TP393

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2024)08-0150-12

Research on Intelligent Color Design of Ship Cabin Interiors Based on Multi-source Data Fusion and Interactive Particle Swarm Optimization

SHEN jie¹, XU Lijun²

1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212100, China;

2. Institute of Art and Design, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China

Abstract: Colors play a crucial role in enhancing the attractiveness of ship cabins and optimizing passenger

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20210449); 2023 江苏省高校哲学社会科学项目(2023SJYB0429); 2023 年江苏省研究生教育教学改革项目(2023YJYJG02).

作者简介: 沈洁, 硕士, 讲师, 主要从事船舶舱室内装设计及可持续设计研究.

experiences. To accurately and effectively assess the connection between interior color design of cabins and passengers' emotional perception, this paper proposes and designs an integrated framework based on Immersive Virtual Reality (IVR), combining environmental data, emotional demand analysis, and user feedback. Firstly, an optimization model incorporating two measurement methods, visual harmony and human preferences, was established to evaluate the aesthetic performance of color combinations. Subsequently, a pleasure-related language value assignment method was employed to estimate the visual harmony scores of color combinations. To solve the proposed optimization model, an Interactive Particle Swarm Optimization (IPSO) algorithm based on small groups was adopted by considering emotions and preferences for color combinations through human judgment. The prototype system was developed in the Unity 3D game engine environment and implemented with the HTC Vive head-mounted display to provide an interactive and immersive user experience. Finally, user tests in different ship cabin interior scenes were conducted to validate the research framework by integrating data from various sources. The test results indicate that the proposed method can automatically adjust the colors of ship cabins in cabin scenes to better match passengers' emotional needs.

Key words: multi-source data; cabin interior; color design; emotion matching; immersive virtual reality; interactive particle swarm optimization

船舶是人类重要的交通工具之一,在智能化发展背景下船舶舱室内装智能设计作为提升内部环境质量的重要方向备受关注^[1]。舱室内装设计不仅关乎乘客的舒适感,也直接影响到工作人员的工作效率和心理健康^[2]。随着人们对旅行舒适度和情感体验的需求不断提升,不同乘客的需求各异,舱室环境色彩配置难以一致适用。在过去的设计实践中,通常过于注重功能性而忽视了用户的情感体验^[3]。近年来,有的研究关注到用户情感与色彩之间的关联,尤其在室内设计领域^[4]。在舱室内装设计的演进过程中,色彩作为一种重要的设计元素逐渐受到关注。透过色彩,设计师可以创造出不同的空间氛围,影响乘客的情感体验。因此,研究舱室内装中色彩的运用对于提升整体设计品质至关重要^[5]。

在船舶舱室内装设计的早期阶段,设计重点主要集中在舱内结构和功能性布局。传统的设计理念更注重实用性和经济性,以满足大规模运输为主要目标。这一时期的舱室内装通常以简单的布局为主,色彩和材质选择相对单一,强调实用性和耐久性。早期船舶装饰设计主要采用手工设计的操作模式,也就是将设计装饰部分的平面构图形式直接体现在船舶室内结构图中。相关设计人员可根据个人经验或既定设计准则对舱室内装饰色彩环境进行复原处理,但由于其复杂的空间性结构极易造成设计强度增大,从而导致板材过量使用的问题。从色彩环境角度来看,由于设计人员不能准确把握船舶舱室内装饰色彩的整体布局形式,容易造成最终设计作品出现色彩混乱且复杂的情况,不但为船舱内人员带来极不舒适的观赏感觉,也会导致实际设计方案与原始期望值出现较大偏差。

随着科技进步,智能技术的应用为船舶舱室内装设计带来了新的可能性。智能化系统可以根据乘客偏好和行为习惯,自动调整舱室内的光照、温度和音响等因素,提升用户体验^[6-7]。同时,通过数据采集和分析,智能系统还能为用户提供更多关于乘客需求的信息,从而为设计过程提供有力支持。随着虚拟现实(VR)等新技术的发展,色彩设计进入了数字化时代^[8]。在船舶舱室内装设计中,设计师可以利用虚拟现实技术来模拟不同色彩方案,让用户在数字环境中体验设计效果^[9-10]。因此,如何通过智能化手段来实现船舶舱室内装的人性化、个性化成为当前研究的焦点之一。

本研究结合用户情感和先进的设计优化方法,构建一种智能色彩设计框架,从而提升船舶舱室内装的设计水平。通过对用户情感与色彩关联的深入研究,能够更好地理解用户在船舶舱室内的需求,从而创造出更具人性化和情感共鸣的设计方案。同时,引入沉浸式虚拟现实技术和交互式粒子群优化算法,将设计

过程推向智能化和高效化方向,为船舶舱室内装设计领域带来创新思维。

本研究的主要目标旨在设计一种船舶舱室内装智能色彩设计框架,通过融合环境感知、情感需求分析和用户反馈等多源信息,结合沉浸式虚拟现实技术和交互式粒子群优化算法,实现船舶舱室内装色彩的最优搭配,提升船舶内部环境的舒适度、个性化体验和乘客满意度。

本文的研究贡献如下:

1) 提出一种多源数据融合方法,整合用户偏好、环境数据和设计元素特征,为智能色彩设计提供全面的信息支持。

2) 采用一种基于小群体的交互式粒子群优化算法,通过人工判断来考虑情绪对色彩搭配的偏好,实现对色彩搭配的高效优化,满足用户对舱室内装设计的个性化需求。

3) 引入沉浸式虚拟现实技术,为用户提供交互式 and 身临其境的体验,也为船舶舱室内装设计的智能化设计提供一种创新思维。

1 文献综述

1.1 舱室色彩美学理论

船舶色彩包括两个方面,一是指船舶外观设计的色彩,这方面比较简单,一般船舶都采用白色作为主体色;另一方面是指船舶内装设计所用的色彩,船舶内装色彩具有美学价值和使用价值,即美化环境和改善室内空间的效果。

色彩是一种媒介,具有传递信息、易辨别等功能,例如交通灯以及各种指示牌中的红绿黄 3 个颜色,红色是禁止,绿色是安全,黄色是需要注意,这些都是通过色彩传递出来的信息。而船舶内装,即船舶舱室应用色彩时应根据不同舱室的功能选用不同的色彩,使舱室功能分明、性格突出。在船舶舱室设计时必须根据色彩对心理的远近、冷暖等影响,最大限度地利用色彩为船员及乘客设计舒适的舱室环境,以缓解长时间生活在船舶上造成的心理不适。船舶舱室色彩设计时必须首先考虑船舶的时代、地域、民族等特点,其次还要考虑船上居住人员性别、年龄、职业、教育背景的不同,才能在船舶舱室设计中把色彩的作用发挥最大。

色彩作为服务景观的研究主要集中在色调上。色调由光的波长决定,红色和黄色是波长相对较长的颜色,被归类为暖色;而蓝色和绿色是波长相对较短的颜色,被归类为冷色。每种色调都包含一些含义,这些含义可能会根据上下文而有所不同。例如,红色一般会引发兴奋、力量、激情、危险等情绪,但在商业语境中它具有力量、活力、速度、勇气等积极含义,也有愤怒、霸道等消极含义^[11]。因此,关于色调影响的研究主要通过比较暖色和冷色来调查顾客的感知和行为意图,而不是单独分析每种色调。

色彩具有轻重感和距离感,在船舶舱室设计时利用色彩的这一特性可以调整人们对船舶空间的感观。由于色彩面积大小也可调整人们对空间的感觉,使空间平衡,因此船舶舱室的天花板应采用较轻的上浮色,地板应采用较重的下沉色,同时还必须使天花板与地板色彩简单,且不应变化太大。

1.2 色彩与情绪相关研究

研究表明,不同的色彩可以引发不同的情感和和心理反应^[12-13]。例如红色会使人兴奋,血液流动加快,脉搏跳动增强;而橘黄色为主色调的餐厅比绿色、蓝色为主色调的餐厅更能引起人们的食欲;以蓝色调为主的房间比以红色调为主的房间更能平复人们的情绪,使人安定下来;而绿色则可消除疲劳、缓解精神压力。从生理角度来看,暖色对人有更令人振奋的作用,例如增加血压或频繁眨眼,这更接近于高度紧张的反应而不是愉悦。在情感反应方面,顾客在接触冷色调内饰时会感到更具吸引力和愉悦感。因此,在舱室内装设计中,根据航程和使用场景巧妙地运用色彩可以达到增进乘客舒适感和提升整体空间感的效果。

对色彩和情绪的研究可以追溯到 19 世纪^[14]; Yang 等^[15]强调在研究人类对艺术作品的心理反应时,颜色和情绪显著相关; Xu 等^[16]提出室内设计的颜色方案会影响就餐者的行为和情绪。

色彩及其可能传达的情绪已被证明具有普遍的关联. 国内外学者对此做了大量研究. Tham 等^[17]对 89 篇论文进行文献综述, 发现在跨文化颜色意义方面存在共享的解释. Jonauskaitė 等^[18]在一个涉及 30 个国家、22 种语言共 4 598 名参与者的用户研究中测试了情绪关联, 发现不仅存在情绪与颜色之间的强烈普遍关联, 还存在基于地理位置和语言相似性的强烈本地关联. Houssein 等^[19]利用人工智能和机器学习, 提出了一种利用脑电图识别和分类人类情绪状态的方法, 该方法概述了情感识别问题的脑电图信号采集、预处理、特征提取、特征缩减和选择、分类及性能评估, 并深度讨论了与情绪密切相关的脑电图节律以及不同大脑区域和情绪之间的关系. Cha 等^[20]进行了一项实验, 以了解室内虚拟环境颜色与情绪之间的关系, 发现颜色可以影响用户的心率和任务表现, 进一步证明了着色算法的价值. Lin 等^[21]设计了一个优化过程, 以自动建议室内场景的颜色设计. Li 等^[22]建立了一个用于汽车内饰色彩设计的具有定性和定量测量的感性工程系统(Kansei Engineering System, KES), 该系统通过训练反向传播神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)、基于遗传算法的反向传播神经网络(Genetic Algorithm based Backpropagation Neural Network, GA-BPNN)、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)和基于遗传算法的支持向量机(Genetic Algorithm based Support Vector Machine, GA-SVM)来构建评估方法来预测图像排名, 并给出了一个汽车内饰的案例来完成计算. 研究结果显示, 人工智能可以取代设计师在概念或其他设计过程中做出决策.

2 方法

本研究设计并开发了一种融合多源数据(环境数据、乘客色彩偏好和情感需求), 基于虚拟现实的沉浸式互动框架, 该框架可以帮助研究人员分析乘客色彩偏好和情感需求之间的相关性, 并在基于交互式粒子群优化算法(IPSO)的色彩搭配优化过程中, 通过交互式评估乘客视觉美学偏好来调节舱室色彩. 图 1 介绍了该框架的机制和工作流程.

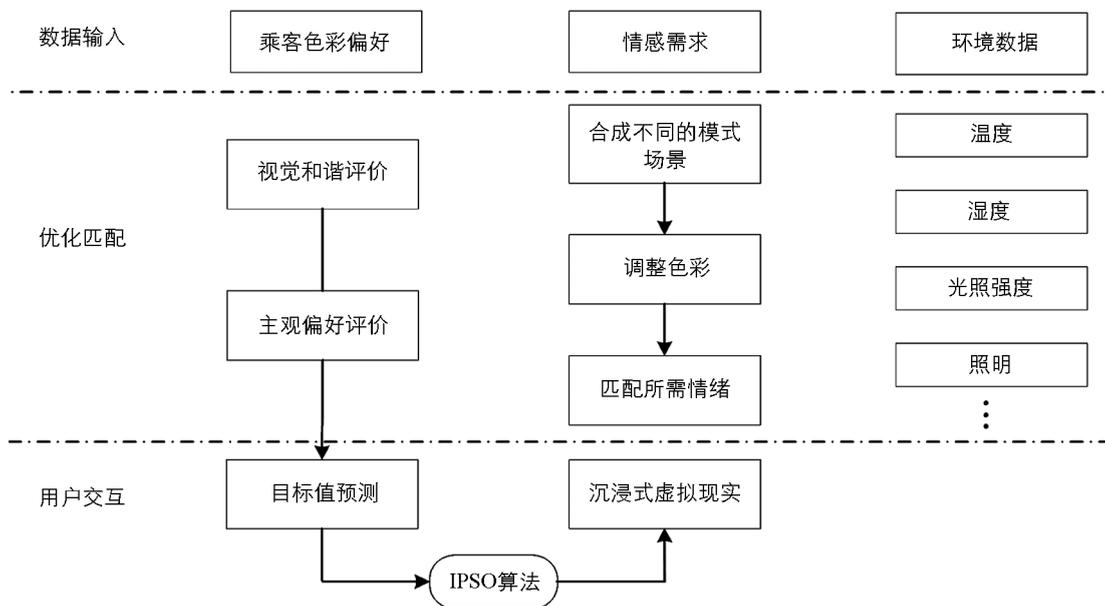


图 1 船舶舱室内装智能色彩设计框架

我们采用一种基于 IPSO 算法和 IVR 的方法, 获得最佳的色彩搭配. 该方法以人机交互方式找到最佳色彩搭配的过程如图 2 所示. 首先, 生成初步的色彩搭配方案, 并在虚拟现实环境中进行渲染和展示. 乘客可以充分探索色彩的虚拟属性, 并反馈其对呈现的色彩搭配方案的偏好程度. 同时, 将视觉和谐度得分与主观偏好这两个得分的总和反馈给 IPSO 算法作为总体目标值(美学度量). 然后, IPSO 算法基于反馈生

成新的色彩搭配方案,并将其发送到 VR 界面进行另一次迭代.值得强调的是,一旦生成了色彩搭配,3D 环境的渲染便可实时呈现给用户.本研究提出的方法通过 C# 语言嵌入在游戏引擎 Unity 中.当 IPSO 算法生成新的色彩搭配方案时,游戏引擎从数据库中检索相应的色彩参数和纹理,并实时渲染内部装饰模型.迭代过程直到 IPSO 达到其中一个终止准则为止,例如完成指定数量的迭代并且在用户满意度方面没有进一步改善为止.

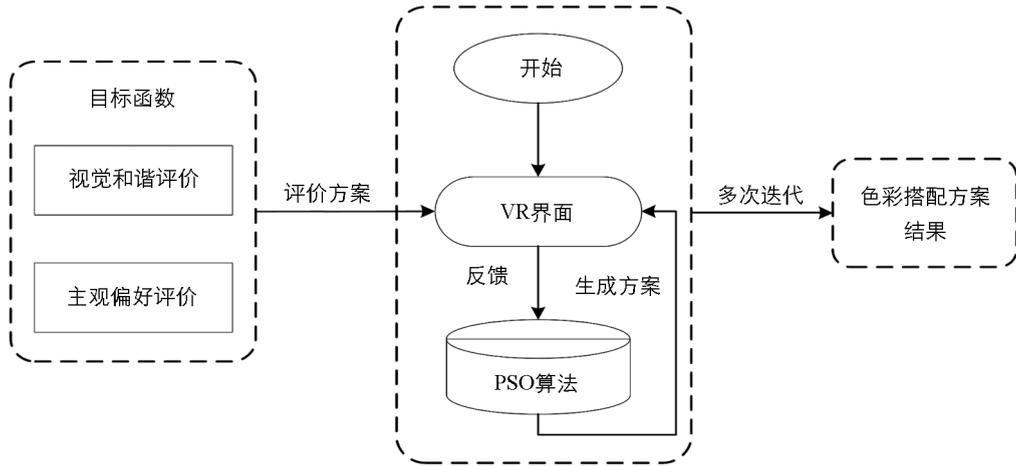


图 2 基于 IPSO 的色彩搭配优化

为了提升乘客在色彩产品选择方面的体验,我们建立了 IVR 环境下船舶舱室内装饰色彩搭配的优化模型,最大限度地提高了乘客对色彩搭配美学的满意度,并帮助乘客和设计师有效地探索设计方案.本研究提出的目标函数表示为公式(1),旨在最大限度地提高色彩搭配的美学度量.事实上,视觉和谐度以及乘客偏好对于衡量色彩搭配的美学效果至关重要.因此,在我们提出的方法中,如公式(1)所示的目标函数由两部分组成.其中一部份, $b(I_x)$ 衡量一种色彩搭配的视觉和谐度;而另一部分, $u(I_x)$ 则衡量乘客对色彩搭配的偏好程度.

$$Objective(I_x) = \operatorname{argmax}_{I_x} \{ \theta_1 \cdot b(I_x) + \theta_2 \cdot u(I_x) \} \quad (1)$$

其中, I_x 代表由 $5T$ 个决策变量组成的第 x 个材料搭配方案,而 $5T$ 指的是在船舶舱室内装修设计,每种材料产品根据其5个审美特征参数(颜色的明度、颜色在红色和绿色之间的光谱位置、颜色在黄色和蓝色之间的光谱位置、光泽度、金属感)与材料种类数 T 的乘积,得到的总决策变量数. θ_1 和 θ_2 分别是视觉和谐度和乘客偏好这两个子目标的权重.

需要注意的是,在给定的舱室中每个色彩设计方案都由多个色彩(T)组成,每个色彩由上述5个参数决定.因此,色彩搭配优化模型中有 $5T$ 个决策变量.

2.1 视觉和谐度测量

在实际中,柔和、冷酷、平静等情感术语和形容词被用来描述色彩的光学特性,强调色彩在人类感知中发挥的强大心理印象.色彩能够唤起一系列心理联想,可以通过与愉悦相关的语言进行匹配,应用于视觉和谐度评估.本研究采用基于语言的图像量表来描述与愉悦相关的语言特征,以表示色彩的心理印象,并对色彩搭配方案的视觉和谐度进行定量评价.具体而言,色彩搭配方案的视觉和谐度是通过被分析色彩搭配的语言值分布(WLD_c)与参照色彩搭配的语言值分布(WLD_r)之间的归一化差异来计算的,如公式(2)所示.参考色彩搭配是由乘客以图像和模型的形式指定视觉和谐搭配.本研究所提方法不是通过计算 WLD_c 和 WLD_r 之间的成对距离,而是使用 Hausdorff 距离来估计不相似度,如公式(3)所示.

$$b(I_x) = 1 - \text{Normalized}(\text{Dissimilarity}(WLD_r, WLD_c)) \quad (2)$$

$$\text{Dissimilarity}(WLD_r, WLD_c) = \max_{wlv_r \in WLD_r} \min_{wlv_c \in WLD_c} \| wlv_r - wlv_c \| \quad (3)$$

其中, wlv_r 表示参考色彩搭配方案的语言值, wlv_c 表示被分析的色彩搭配方案的语言值. $b(I_x)$ 表示被分析溶液的视觉和谐度.

本研究中的色彩语言值分布通过遵循一个全面的程序产生(图 3). 首先, 为每种色彩类型开发了两种色彩集——兴奋色彩集和平静色彩集. 这些色彩集由能唤起兴奋或平静印象的色彩组成. 此处的兴奋色彩集包含给人有趣或刺激情感印象的色彩; 而平静色彩集则由舒缓、宁静和舒适的色彩组成. 表 1 给出了用于优化设计的兴奋—平静色彩集. 如表 1 所示, 每种色彩都对应一个令人兴奋—平静相关的语言值. 例如, 兴奋色彩集具有 1 的兴奋等级和 0 的平静等级, 它们的外观由 5 个属性参数决定. 其他颜色的兴奋/平静等级根据它们与这两组色彩集的距离来估计. 语言值距离的方程为公式(4)和公式(5), 其余颜色到平静色彩集和兴奋色彩集的平均距离分别通过方程(6)和方程(7)计算. 根据每种颜色与平静色彩集和兴奋色彩集的距离及平均距离, 使用公式(8)至公式(11)计算色彩(以 XEA 和 XCA 表示)的兴奋和平静等级.

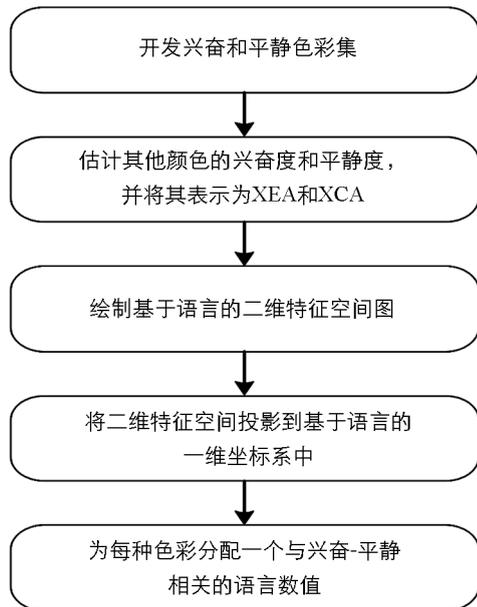


图 3 基于色彩语言的图像尺度开发程序

$$XDC(w_x, C) = \min\{\|w_x - c_y\|, c_y \in C\} \quad (4)$$

$$XDE(w_x, E) = \min\{\|w_x - e_z\|, e_z \in E\} \quad (5)$$

$$AvgD(W, C) = \sum_{w_i \in W} \frac{XDC(w_x, C)}{T_w} \quad (6)$$

$$AvgD(W, E) = \sum_{w_i \in W} \frac{XDE(w_x, E)}{T_w} \quad (7)$$

$$\tilde{X}CA(w_x, C) = 1 - \frac{XDC(w_x, C)}{AvgD(W, C) + AvgD(W, E)} \quad (8)$$

$$XCA(w_x, C) = \begin{cases} \tilde{X}CA(w_x, C) & \tilde{X}CA(w_x, C) \in [0, 1] \\ 1 & \tilde{X}CA(w_x, C) > 0 \\ 0 & \tilde{X}CA(w_x, C) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\tilde{X}EA(w_x, E) = 1 - \frac{XDE(w_x, E)}{AvgD(W, C) + AvgD(W, E)} \quad (10)$$

$$XEA(w_x, E) = \begin{cases} \tilde{X}EA(w_x, E) & \tilde{X}EA(w_x, E) \in [0, 1] \\ 1 & \tilde{X}EA(w_x, E) > 0 \\ 0 & \tilde{X}EA(w_x, E) < 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, w_x 表示根据上述 5 个变量作为 5 维数据点分析的色彩; XDC 表示色彩 w_x 与预设的平静色彩集 C 之间的距离; XDE 表示色彩 w_x 与兴奋色彩集 E 之间的距离; c_y 和 e_z 分别是与色彩 w_x 最接近的平静色彩和兴奋色彩; W 表示除色彩集 C 和 E 之外所有颜色的集合; T_w 表示集合 W 中所有颜色的数量; $\tilde{X}CA$ 和 $\tilde{X}EA$ 中的波浪线表示其为估计值, 即用户对色彩集表现出平静和兴奋的主观估计值.

表 1 兴奋色彩集和平静色彩集示例

色彩集	颜色	等级	色彩集	颜色	等级
兴奋色彩集		0.8	平静色彩集		0.4
		0.9			0.1
		0.7			0.3
		0.6			

根据每种色彩的兴奋等级和平静等级,可以绘制出兴奋-平静等级的二维特征空间图.在本研究提出的目标函数中只使用一个数字来表示语言意义,并将二维的兴奋-平静等级投影到一维坐标系上.图 4 所示的投影线代表通过中点(0.5, 0.5)的理想一维图像比例.每个投影点与中点(0.5, 0.5)之间的归一化距离定义了原始点在基于语言的一维图像比例尺上的坐标.数值的符号(正或负)表示对色彩的心理印象偏向兴奋或平静.例如,1 代表完全兴奋的印象,而-1 则表示完全平静的印象.

对于每个色彩搭配方案,都有 T 个最终色彩决策和 T 个色彩语言值,由此可以生成色彩语言值分布,简称 WLD (图 5).

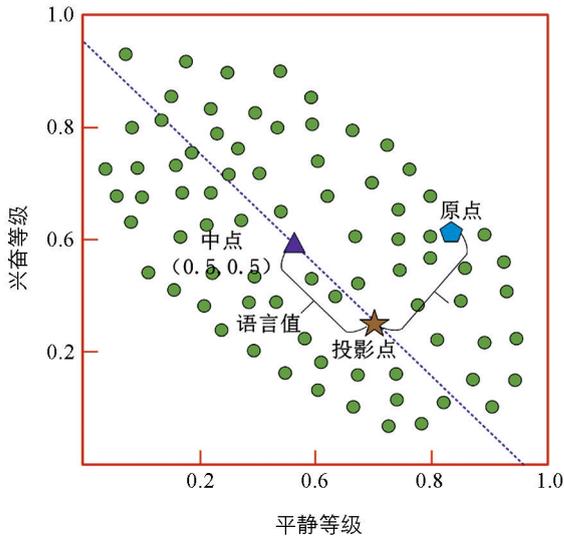


图 4 一维图像比例坐标系

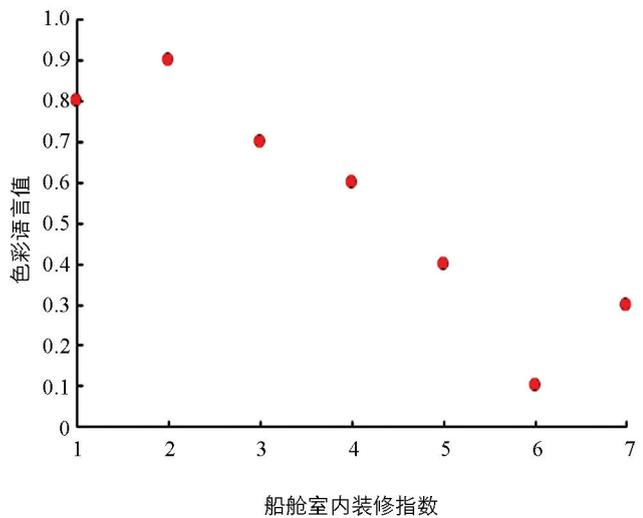


图 5 色彩语言值分布

2.2 色彩搭配偏好程度测量

目标函数中的偏好度量 $u(I_x)$ 用于评估乘客对给定色彩搭配方案的偏好程度.通常情况下,乘客对给定色彩搭配方案的偏好程度是由文化、社会、教育和心理因素共同决定的.偏好程度是一个主观标准,很难用参数公式来表示.因此,本研究通过直接对色彩搭配方案进行评分,而不是建立数学公式将人们的判断纳入其中.乘客可以用-1、0 和 1 分别代表他们对色彩搭配方案的不同态度,即不可接受、可接受和喜欢.

2.3 IPSO 色彩搭配优化算法

色彩搭配偏好不可测量,因此无法通过量化方程来确定.本研究采用交互式优化算法来解决优化模型,其中色彩搭配偏好由乘客分数来衡量.具体来讲,采用交互式粒子群优化(IPSO)算法对已建立的优化模型进行求解.选择 IPSO 的原因是与其它进化算法相比,IPSO 具有更强大的信息共享机制.此外,与遗传算法和其它常见的进化算法相比,IPSO 在优化问题上效率更高,变量范围简单.通过 PSO 获得令人满意的结果需要多次迭代,繁琐且耗时.由此可见,使用传统的迭代方法并不可行,因为传统方法中的色彩

搭配方案需要通过乘客评分来评价, 乘客在与系统进行密集交互后容易失去兴趣或注意力, 无法准确分配分数. 为了平衡人们疲劳因子带来的负面影响, 本研究采用了改进的小群体 PSO 算法和需要较少人为交互的基于距离的目标值预测函数来求解优化模型.

基于小种群的 IPSO 采用突变操作、DE-acceleration 算法和迁移操作 3 种方式, 增强小种群搜索的多样性, 加快操作过程的收敛速度, 避免群体拥挤多样性导致其达不到期望的多样性水平. 此外, 本研究采用基于欧几里得距离的方法来促进优化的收敛性, 并测量当前色彩搭配方案与乘客评分的历史方案之间的距离, 以便预测未评分的方案, 而无需额外的乘客交互. 这里指定了一个从 0.9 到 0.4 的时间递减惯性权重 ω , 因为开始时较大的惯性权重有助于找到好的种子(初始解), 而在实现后期较小的惯性权重有助于进行精细搜索. 首先, 随机初始化 5 种色彩搭配方案 I_x . 每个色彩搭配方案 $i(x, t, y)^z$ 由 5T 个决策变量组成. 其中, x 是色彩搭配方案指数; 其中 t 是舱室内饰面(地板、墙壁、天花板和台面等)的指数; y 是视觉特性的指标; z 是被分析的迭代指数. 在第 1 次迭代中, 所有粒子都设置为 gbest. 然后, 系统会提示乘客对 5 种色彩搭配方案进行偏好评分. 具有最高目标值(偏好目标值 $u(I_x^z)$)和视觉和谐目标值 $b(I_x^z)$)被确定为当前迭代中的全局最优解 gbest. 再开始第 2 次迭代. 每个粒子的速度和位置根据指示方程进行更新. 然后再次评估所有方案, 以确定新的当前迭代的局部最优解 pbest 和全局最优解 gbest.

$$\omega = \omega^{\min} + \frac{z(\omega^{\max} - \omega^{\min})}{x^{\max}} \quad (12)$$

其中, ω^{\min} 是最小惯性权重, ω^{\max} 是最大惯性权重, x^{\max} 是迭代总数. 在第 3 次迭代后应用基于距离的方法来预测乘客可能给出的分数, 并消除在每次迭代过程中进行人机交互的需求, 同时使用方程计算新方案的预测偏好分数. 根据与所有乘客评分色彩方案位置的距离比例, 利用公式(13)计算出新方案的预测偏好分数. 该方法可预测接下来 20 次迭代(第 4 次至第 24 次迭代)中色彩方案的偏好分数, 然后在第 25 次迭代中提示乘客为色彩方案打分, 其结果将用于后续迭代(第 26 次至第 76 次迭代)的预测函数方法中, 以修正后续迭代方案的演化方向. 表 2 总结了通过乘客评分法或预测函数法进行偏好评估的迭代指标(需要注意的是, 这种预测方法的假设是乘客对类似色彩搭配方案的偏好程度基本相同). 最后, 将 180 次迭代中目标值最高的 3 种舱室内装饰色彩搭配方案确定为最佳方案, 并推荐给乘客进行最终决策.

$$u^*(I_i^z) = \frac{\sum(d_i u(I_x^z))}{\sum d_i} \quad (13)$$

其中, $u(I_x^z)$ 表示乘客对色彩方案 I_i^z 的偏好评分; d_i 表示无标记的色彩方案 I_i^z 与乘客评分色彩方案 I_x^z 之间的距离.

表 2 预测函数的迭代执行情况

迭代次数	评估者	迭代次数	评估者
1	乘客	26~76	预测函数
2	乘客	77	乘客
3	乘客	78~178	预测函数
4~24	预测函数	179	乘客
25	乘客	180	乘客

3 用户测试

3.1 实验设置

为了测试本研究提出的色彩设计框架的可用性, 我们通过游戏引擎 Unity 3D 开发了一个原型系统, 并使用一组头戴式 VR 显示设备(HTC Vives)来实现, 以创建一个身临其境的交互式环境. IVR 环境中的色

彩模型由具有两年相关工作经验的 2D/3D 美术师通过视觉比较进行开发和校准。此外, IVR 模型在视觉感知方面是一种有效的环境表示, 其中用户拥有与真实环境中相似的感知和性能。在这种情况下, IVR 环境中的场景设计可以达到令人满意的逼真光学属性水平, 以帮助匹配参与者的情感需求。测试原型系统时使用了具有以下技术规格的计算机: Intel Core TM i7-7820 处理器、NVIDIA GeForce © GTX 1080、16 GB RAM。在对色彩进行美学评估时, 参与者通过 HTC Vive 耳机进入 IVR 环境, 如图 6 所示。



图 6 参与者使用带有 HTC Vive 的原型系统

为了测试本文方法在不同方面的有效性, 进行了两项独立的研究。具体为:

(1) 对综合结果进行评分和分类

在这项研究中, 本文方法的综合结果在 40 名参与者中进行了测试, 他们的年龄在 18~40 岁范围内。参与者被要求戴上 VR 头戴设备观看优化的不同场景, 并根据多种合成场景完成以下 3 项任务。

任务 1: 评分。参与者使用 5 级李克特量表对本文方法生成的 5 个结果进行评分, 且该评分反映了参与者认可本文结果与输入情绪相符的程度。5 分表示“非常同意”, 1 分表示“非常不同意”。为了保持一致性, 本研究在整个任务过程中使用“娱乐室”(平静、忧郁、欢乐、兴奋、浪漫)这 5 个场景来表示所有情绪。

任务 2: 情绪识别。除了“娱乐室”场景之外, 我们还使用了其他 3 个场景(卧室、餐厅、浴室), 展示了 5 种结果, 并要求参与者从列表中选择一种他们认为与场景最匹配的情绪。该任务旨在确定参与者是否能够在场景优化中匹配目标情绪。本研究提供了 5 种场景-情绪组合: 娱乐室(兴奋)、卧室(浪漫)、卧室(忧郁)、餐厅(欢乐)、浴室(平静)。除了提到的情绪之外, 情绪列表还包括额外的“其他”选项, 该选项适用于 4 种情绪都不匹配的情况。

任务 3: 真实感。参与者被要求根据他们对着色逼真度的评价对两个场景进行打分, 这两个场景都是通过优化过程合成的。在此任务中, 使用了“餐厅”(兴奋)和“卧室”(平静)这 2 个场景。

(2) 消融比较

本研究评估并比较了 3 种色彩模式的结果(仅真实感模式、最佳模式和情绪优化模式)。仅真实感模式的权重设置为 1.0(真实度)和 0.0(情绪); 最佳模式的权重设置为 0.3(真实度)和 0.7(情绪); 情绪优化模式的权重设置为 0.0(真实度)和 1.0(情绪)。参与者需选择使用 3 种颜色模式合成场景的主导情绪, 并评估结果场景的配色方案在现实中是否常见。该项任务共招募了 39 名受试者, 他们大多是学生, 平均年龄为 24 岁。

3.2 结果与分析

任务 1 和任务 3 场景中所有场景的平均得分为 3.918(满分 5.000)(平均而言, 参与者认为结果场景与期望的情绪相匹配)。在任务 1 和任务 3 使用的 7 个场景中, 最常见的得分是 4 分, 如图 7 所示。由于平均评分为 3.918, 证明多数参与者都认为本文方法的合成结果令人信服。

分析: 对于任务 1 和任务 3 的数据, 我们对所涉及的场景进行了方差分析测试, 并在所有广泛积极的情绪(欢乐、平静和浪漫)之间进行了方差检验(表 3)。零假设表示两个场景的评分没有差别。对于广泛的负面情绪(忧郁), 我们进行了成对 t 检验。在任务 3 中, 根据真实感对两个场景进行了同样的评估。

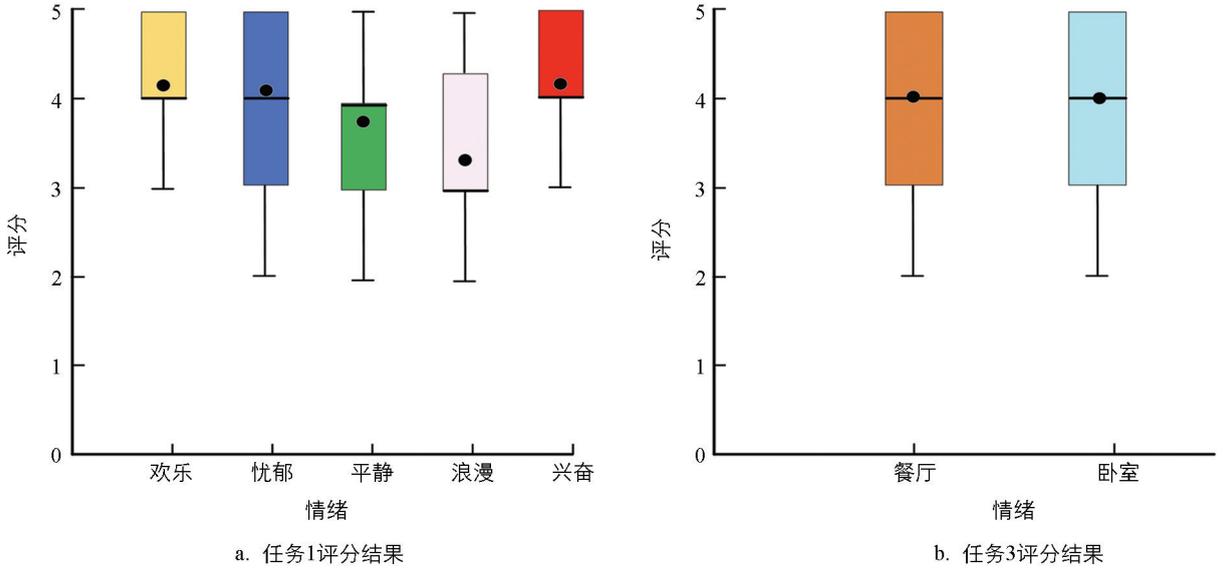


图 7 任务 1 和任务 3 的参与者评分结果

表 3 任务 1 和任务 3 的方差分析检验 p 值

场景	p 值	场景	p 值
所有场景	0.03	仅积极情绪优化的娱乐室场景	0.008
仅情绪优化的娱乐室场景	0.008		

任务 2 的结果如图 8 所示, 对于任务 2 中使用的 5 个优化场景中的 4 个场景, 用户更倾向于选择经过优化更符合其情感需求的色彩场景。

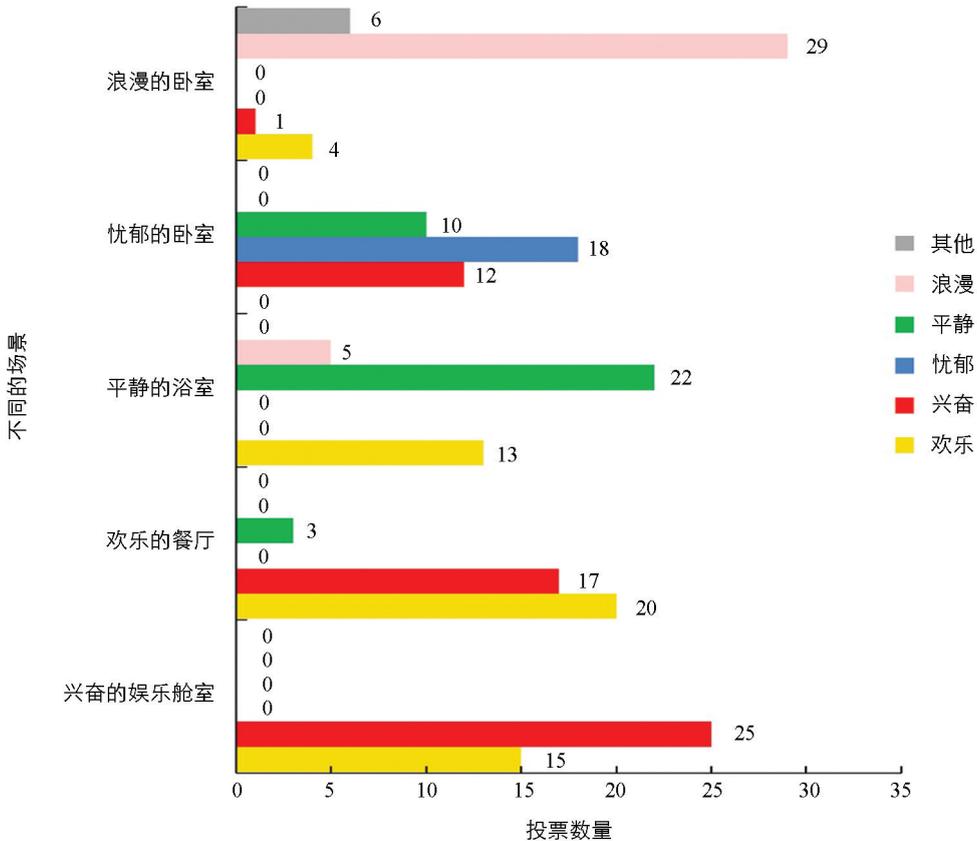


图 8 参与者对不同场景感知情绪的投票数量

对于任务 2 的结果, 卡方检验的所有 p 值均低于 0.05, 表示对原假设的否定. 图 8 显示, 优化的情绪能够获得较多的选票, 但“忧郁的卧室”场景除外, 在这个场景中忧郁情绪获得了最多的选票(18 票), 其中平静获得了 10 票, 这可能是由于忧郁和平静在一定程度上具有共同的语义. 由于这两种场景大多使用冷色进行优化, 因此在某种程度上可以合理地将它们交互解释.

在“平静的浴室”场景中, 22 票投给了平静, 13 票投给了欢乐, 5 票投给了浪漫; 另外一个负面情绪没有得到选票. 对于“浪漫的卧室”场景, 虽然大多数参与者投票支持浪漫的情绪(29 票), 但 6 票投给了其他, 4 票投给了欢乐. 在“欢乐的餐厅”场景中, 欢乐的票数为 20 票, 兴奋的票数为 17 票, 平静为 3 票. 在“兴奋的娱乐室”场景中, 兴奋情绪的票数为 25 票, 欢乐情绪的票数为 15 票.

本研究旨在测试两个问题: ① 哪种情绪在场景中最占主导地位? 这些选项包括前面提到的 5 种情绪以及“无偏好”选项. ② 色彩分布是否与该类型场景的常见色彩分布相似? 答案是“是”或者“否”. 表 4 显示了使用卡方检验计算的与问题相关投票的 p 值.

对于问题①, 零假设是参与者对每种情绪的投票数相同. 对于问题②, 零假设是在二进制问题中参与者投给“是”和“否”的票数相同, 但真实场景除外, 这些场景是情绪未优化的场景. 对于这些场景, 假设参与者会压倒性地投赞成票(假设 38 票投给“是”, 1 票投给“否”, 以避免除以 0 的错误).

对于问题①, 我们发现 p 值远低于阈值 0.05, 因此研究结果表明每种情绪投票率之间存在差异. 对于问题②, 结果更加多样化, 意味着要么在真实场景中参与者压倒性地投了赞成票, 要么在所有其他情况下参与者在“否”选项和“是”选项之间投票均衡. 对于根据情绪进行优化且 p 值小于 0.01 的场景, 发现在 5 种情况下, 参与者更多地投票投给了“是”, 而在其他情况下投票数量比较均衡.

表 4 根据研究数据计算得出的 p 值

模式	场景	问题 1	问题 2
真实场景	浴室	小于 0.01	小于 0.01
	卧室	小于 0.01	0.04
	餐厅	小于 0.01	0.04
	娱乐室	小于 0.01	1.00
最佳场景	平静的浴室	小于 0.01	小于 0.01
	忧郁的卧室	小于 0.01	0.04
	欢乐的餐厅	小于 0.01	小于 0.01
	兴奋的娱乐室	小于 0.01	小于 0.01
	浪漫的卧室	小于 0.01	小于 0.01
情绪优化	平静的浴室	小于 0.01	小于 0.01
	忧郁的卧室	小于 0.01	0.04
	欢乐的餐厅	小于 0.01	0.02
	兴奋的娱乐室	小于 0.01	小于 0.01
	浪漫的卧室	小于 0.01	0.90

4 总结

本研究通过将环境数据、情感分析和用户反馈等多源信息整合, 提出并设计了一种基于沉浸式虚拟现实(IVR)的集成框架, 旨在准确有效地评估舱室内装色彩设计与乘客情绪感知之间的联系. 由于描述情绪是主观不可计算的, 因此建立了一个优化模型, 结合了视觉和谐与人体偏好两种测量方法, 用于评估色彩搭配的美学度量. 为了求解该优化模型, 采用了一种基于小群体的交互式粒子群优化(IPSO)算法, 通过人工判断来考虑情绪对色彩搭配的偏好. 在沉浸式虚拟环境现实中, 通过在不同船舱室内场景中进行用户测试, 验证了本研究的沉浸式虚拟现实集成框架的有效性. 虽然本研究在船舶舱室内装智能、人性化色彩设计的应用中取得了一定的成果, 但仍存在一些局限性. 例如, 研究中采用的偏好度量是基于乘客的主观评分, 而个体对颜色的喜好是主观而复杂的, 受文化、社会、教育和心理因素等多方面的影响. 因此, 模型的

局限性在于无法充分捕捉每位乘客的独特偏好,可能存在个体差异。在交互式粒子群优化算法中,乘客需要多次评分,而人机交互可能导致乘客疲劳和失去兴趣,影响评分的准确性。这在长时间的实验中可能会出现,需要更好地考虑乘客参与的时间和疲劳度。未来的研究可以考虑引入个性化的颜色模型,通过深度学习等技术来更好地捕捉乘客的个体差异。此外,将引入实时反馈机制,通过集成实时的生理信号、眼动追踪等技术,更快地接收到乘客的反馈信息,提高用户体验。

参考文献:

- [1] 李震,王朝波,闫冬雪. 邮轮居住环境的智能化设计应用 [J]. 舰船科学技术, 2020, 42(19): 65-71.
- [2] 徐俊辉,黄蕾,潘长学,等. 邮轮内装的主题及其美学设计策略 [J]. 中国舰船研究, 2022, 17(2): 38-48, 155.
- [3] 姚竞争,张阳,孙洪源,等. 基于采光及感性认知的邮轮舷窗设计评价 [J]. 舰船科学技术, 2022, 44(13): 31-35.
- [4] 袁利霞. 中国装饰色彩在室内装饰设计中的应用 [J]. 工业设计, 2021(1): 149-150.
- [5] 胡少杰. 色彩在居住类室内设计中的应用策略研究 [J]. 工业设计, 2021(2): 97-98.
- [6] 孟巧,卓悦悦,陈思佳,等. 小型地效翼救助船的外观与内装设计 [J]. 医疗卫生装备, 2022, 8(3): 34-37.
- [7] 蔡薇,谭欣静,陈琪,等. 基于改进能量法的邮轮客舱智能布局设计 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(2): 265-269.
- [8] 张媛,胡玉龙,陈思,等. 基于升降机-梭车自动化立体仓库的船舶舱室物流系统设计与仿真 [J]. 物流技术, 2021, 40(5): 112-117, 160.
- [9] 涂成锋. 虚拟现实技术在船舶舱室内设计中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(18): 16-18.
- [10] 邹燕歆,周泽麟,傅卓琳,等. 基于VR技术的船舶舱室方案设计新体验 [J]. 船舶, 2021, 32(6): 90-96.
- [11] 丁满,孙鸣宇,冯光宇. 技术视阈下产品色彩情感设计研究综述与展望 [J]. 包装工程, 2023, 44(16): 10-21.
- [12] WANG S, YAO M, LIU J Y, et al. Human Perceptual Responses to Multiple Colors II: A Study of the Correlation Between Multiple Colors and Emotion [J]. Color Research & Application, 2022, 47(6): 1242-1258.
- [13] GÜNEŞ E, OLGUNTÜRK N. Color-Emotion Associations in Interiors [J]. Color Research & Application, 2020, 45(1): 129-141.
- [14] ELLIOT A J. A Historically Based Review of Empirical Work on Color and Psychological Functioning: Content, Methods, and Recommendations for Future Research [J]. Review of General Psychology, 2019, 23(2): 177-200.
- [15] YANG H, HAN J, MIN K. Distinguishing Emotional Responses to Photographs and Artwork Using a Deep Learning-Based Approach [J]. Sensors, 2019, 19(24): 5533.
- [16] XU J, LI M C, CAO K Z, et al. A VR Experimental Study on the Influence of Chinese Hotel Interior Color Design on Customers' Emotional Experience [J]. Buildings, 2022, 12(7): 984.
- [17] THAM D S Y, SOWDEN P T, GRANDISON A, et al. A Systematic Investigation of Conceptual Color Associations [J]. Journal of Experimental Psychology General, 2020, 149(7): 1311-1332.
- [18] JONAUSKAITE D, ABU-AKEL A, DAEL N, et al. Universal Patterns in Color-Emotion Associations are Further Shaped by Linguistic and Geographic Proximity [J]. Psychological Science, 2020, 31(10): 1245-1260.
- [19] HOUSSEIN E H, HAMMAD A, ALI A A. Human Emotion Recognition from EEG-Based Brain - Computer Interface Using Machine Learning: A Comprehensive Review [J]. Neural Computing and Applications, 2022, 34(15): 12527-12557.
- [20] CHA S H, ZHANG S J, KIM T W. Effects of Interior Color Schemes on Emotion, Task Performance, and Heart Rate in Immersive Virtual Environments [J]. Journal of Interior Design, 2020, 45(4): 51-65.
- [21] LIN J C, XIAO P T, FU Y N, et al. C3 Assignment: Camera Cubemap Color Assignment for Creative Interior Design [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2022, 28(8): 2895-2908.
- [22] LI X, LUH D B, CHEN Z H. The Application of Kansei Engineering System for Vehicle Interior Color Design [C] // 2023 IEEE International Conference on Image Processing and Computer Applications (ICIPCA). Changchun: IEEE, 2023.