【专题：人工智能驱动的产品情感化设计】

技术视阈下产品色彩情感设计研究综述与展望

丁满，孙鸣宇，冯光宇
（河北工业大学 建筑与艺术设计学院，天津 300132）

摘要：目的 从技术演变视阈下对产品色彩情感设计的研究现状进行梳理和分析，剖析产品色彩情感设计内涵与研究体系，指出未来发展趋势与挑战，为产品色彩情感设计研究提供应用技术与理论参考。**方法** 通过对产品色彩情感设计相关概念与特点分析，归纳总结产品色彩情感设计内涵，并从技术演变角度对用户情感信息挖掘、产品色彩情感意象关联建立、产品色彩情感设计评价与生成等内容阐述产品色彩情感设计的研究现状。**结果** 明晰产品色彩情感设计的知识内涵与体系，总结人工智能时代下产品色彩情感设计的研究热点与发展趋势。**结论** 人工智能技术与设计领域的加速融合，推动了产品色彩情感设计效率的提升，促进了产品色彩情感设计从传统设计方法向基于数据驱动的智能设计方法迁移，为我国社会经济的可持续发展增添动力。

关键词：产品色彩情感设计；人工智能；信息挖掘；情感评价；设计生成
中图分类号：TB472 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2023)16-0010-12
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.16.002

Review and Prospect of Product Color Emotion Design from the Perspective of Technology

DING Man, SUN Ming-yu, FENG Guang-yu
(School of Architecture & Art Design, Hebei University of Technology, Tianjin 300132, China)

ABSTRACT: The work aims to sort out and analyze the current research status of product color emotion design from the perspective of technological evolution, analyze the connotation and research system of product color emotion design, point out the future development trend and challenge, and provide application technology and theoretical reference for the research of product color emotion design. Through the analysis of related concepts and characteristics of product color emotion design, the connotation of product color emotion design was summarized, and the research status of product color emotion design was expounded from the perspective of technological evolution through three research contents: user emotion information mining, product color emotion image association establishment, product color emotion design evaluation and generation. The knowledge connotation and system of product color emotion design were clarified, and the research hotspot and development trend of product color emotion design in the era of artificial intelligence were summarized. The accelerated integration of artificial intelligence technology and design promotes the improvement of the efficiency of emotion design and boosts the migration of product color emotion design from traditional design method to data-driven intelligent design method, and adds impetus to the sustainable development of social economy in China.

KEY WORDS: product color emotion design; artificial intelligence; idnformation mining; emotion evaluation; design generation

新一轮科技革命的深入发展，加速了产品设计从工业制造到智能制造的产业变革，网络化、个性化、情境感知开始成为产品设计的驱动核心[1-3]。而产品色彩作为产品情感第一联想性知觉载体[4-5]，能够触

收稿日期：2023-03-22
基金项目：国家自然科学基金（52275243）
作者简介：丁满（1979—），女，博士，教授，主要研究方向为产品色彩情感设计、智能设计。
通信作者：孙鸣宇（1998—），男，硕士生，主攻情感设计、智能设计。

及人类最深层次的情感体验，进而达到对产品客观物象的超越，从而赋予产品更高的情感价值，提升产品市场竞争力。因此，产品色彩情感化设计一直是工业设计领域的研究热点与重点，是推动我国工业设计可持续发展，建设现代化产业体系的重要手段。

随着人工智能学习技术的发展与人类设计实践活动的不断深入，设计技术手段也发生了历史性的演变[6]。不同时期的产品色彩情感设计方法把产品色彩设计的客观原则与产品现实认知情感的属性规律结合在一起，在实现产品色彩情感创新设计的同时，也呈现出情感认知方式的历史性演变。因此，为加速人工智能技术与产品色彩情感设计的融合，促使产品色彩情感设计顺从时代仪轨，探索与挖掘新的研究范式，提升产品创新设计能力。本文介绍产品色彩情感设计的概念与内涵，并梳理不同技术时期下，产品色彩情感设计研究内容的演变与发展，以期洞悉产品色彩情感设计未来研究热点与趋势。

1　产品色彩情感设计概述与内涵

1.1　产品色彩情感设计概述

所谓情感，是指人对客观事物是否满足自身需要而产生的态度体验，是人们感知世界的基本方式，而产品色彩情感是指用户的感知觉系统受到外界色彩特征的介入，使主观情感与外界客观事实相互融合碰撞，进而引发的一系列心理综合感受[7-8]。因此，产品色彩与情感意象之间存在共存关系，即情感的产生既是色彩对主体的视觉呈现，亦是情感对色彩的感性认知与评价，产品色彩与情感意象的关联是产品经主体感知处理信息后与知识思维相交汇的产物。综上所述，产品色彩情感设计是一种通过挖掘与量化用户潜在情感需求，依据各种技术手段构建情感意象与产品色彩特征之间的关联关系，从而指导产品色彩情感设计的方法。

1.2　产品色彩情感设计的内涵

产品色彩情感设计内涵应从技术手段与存在视角进行剖析，从技术层面来看，技术贯穿于人类文明史，对人类社会的发展起着决定性作用，是“人的自我构造和世界构造的重要环节”，而产品色彩情感设计作为技术生成的重要环节，在“构造”中发挥着关键作用，成为彰显情感意象性的重要手段[9-10]。因此，产品色彩情感设计的本质是技术，从“存在”的角度认识产品色彩情感设计，是对其本体论特性的哲学探讨。探讨产品色彩情感的“存在”必然要谈及产品色彩情感如何存在的问题，即从产品色彩情感的存在论过渡到产品色彩情感的本质论，而产品情感意象的本质是通过产品色彩的存在显现出来的。因此，产品色彩情感设计的存在论暗含了设计的本质论。也就是说，产品色彩的存在形式取决于人的情感需求，情感意象的本质属性取决于其所处的具体存在的语境之中，由此可见，特定的情感本质论决定特定的色彩存在论。即从动态层面来看，产品色彩情感设计的构思（基于社会需求和心理学理论）相当于通过技术手段将用户对产品的情感需求转化为产品色彩特征要素，情感的展现是产品色彩设计的物化成果。因此，可将产品色彩情感设计看作一个行星体系结构（多层球体），将全部设计认知纳入其中，在不同语境下选取特定的角度探究产品色彩情感设计的本质与存在。将产品色彩情感设计内涵结构（如图 1 所示）从内至外划分为三个层级：隐性情感需求层，产品色彩情感设计的本质；参数对流映射层，产品色彩情感设计转译的技术手段；情感外显表达层，产品色彩情感设计的色彩存在形式。

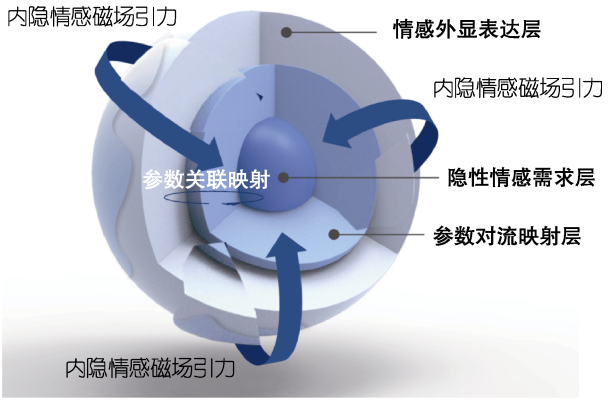

图 1　产品色彩情感设计体系结构

Fig.1 The system structure of product color emotion design

隐性情感需求层：隐性情感需求层是产品色彩情感设计的价值核心，内隐于产品色彩情感设计体系结构内部，不可视且难以模拟。其产生于用户的产品色彩认知过程，是通过自身视觉感官通道对产品色彩情感需求的获取与再创造的结果，在一定程度上影响消费者的购买决策。同时，隐性情感需求作为产品色彩情感设计的本质，能够产生体系内部磁场引力，不断引导着参数对流映射层的构建，进而影响外显层色彩的存在表达。隐性情感需求研究旨在挖掘与揭示用户情感意象偏好，缩小设计师与用户之间的色彩认知差距，洞悉产品市场风格走向，设计出符合用户情感需求的产品色彩，是产品面向市场的先决条件。

参数对流映射层：参数对流映射层是产品色彩情感设计的关联中枢，串联隐性情感需求层与情感外显表达层，并基于此在上下层结构中形成参数映射对流环，从而稳定色彩情感的转译，是产品色彩情感设计输出的关键环节。参数对流映射研究旨在厘清产品色彩与情感意象复杂关联关系，揭示产品色彩情感内隐协同关联机制，辅助设计师明晰色彩内涵，极大地减少设计时间成本，提高产品色彩设计效率。

情感外显表达层：情感外显表达层是产品色彩情感设计的最终阶段。情感外显表达层关注产品色彩设计本身，包括产品色彩邻接关系，色彩面积比例，色彩数量等色彩要素及系统之间的关系。这一层级研究旨在通过产品本身的色彩物理属性与用户进行情感交流，输出产品色彩设计方案，进而实现用户情感需求的精确外显表达。

2 知识体系与研究内容

2.1 知识体系

产品色彩情感设计是基于人类视觉系统、心理学与文化等知识，利用色彩来表现和传达情感，以增强产品的使用体验和用户情感共鸣的方法[11]。基于上述对产品色彩情感设计内涵的解析可知，产品色彩情感设计研究，主要是在对产品相关色彩数据与用户情感意象数据进行提取挖掘的基础上，构建产品色彩与用户情感之间的关联模型，以实现产品色彩情感设计的评价与生成。因此，其研究内容主要分为三个部分：用户情感信息挖掘、产品色彩情感关联建立、产品色彩情感设计评价与生成，其相互作用关系，见图 2。

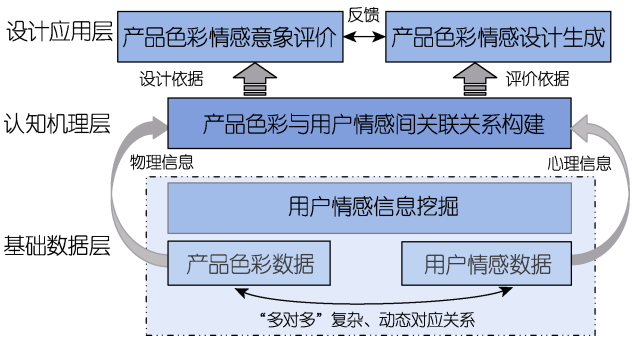

图 2 产品色彩情感设计研究内容体系

Fig.2 Research content system of product color emotion design

2.2 用户情感信息挖掘

意象是指主观情意和外在物象的结合，是人以主观情意去感受客观物象在头脑中所形成的隐性需求，然后再借助艺术等物化手段进行表现[12]。用户情感意象的产生是用户对产品特征感知的心理映射，是通过内部思维转换后的反馈表达结果，属于一种高级的人类心理活动。产品的色彩情感意象是知识信息系统中对产品色彩情感的一种呈现形式，是用户凭借自身感官对产品色彩所产生的直觉联想，能充分传达用户的感性需求，是决策产品能否被购买的重要因素，也是设计师获取用户色彩感性需求的中间媒介，具有重要的理论和应用价值。产品色彩情感设计利用产品色彩设计所涉及的色彩数量、色彩区域划分、区域面积比例等影响因素，结合客观社会及文化给予的产品内涵价值，将产品内隐情感信息传递给用户，以满足用户相应的情感需求，是产品色彩情感设计的根本目的。因此只有切实了解用户的色彩需求偏好及色彩意象的认知过程，尽可能缩小设计师与用户之间的意象认知差距，才能更好地研发出满足用户群感性需求的产品，增加产品的研发成功率，减少研发成本。然而用户的意象感知过程充满模糊性与不确定性，传统方法难以准确了解用户的色彩需求偏好及色彩意象的认知过程。因此，如何借助相应技术手段对用户情感信息进行准确挖掘是现阶段亟待解决的问题。

产品色彩情感信息挖掘是通过相关实验与技术手段获取用户情感信息数据，并对其进行定性、定量分析，实现对用户高维情感认知结构空间坐标定位的方法[13-14]。由于其可为产品色彩情感设计研究提供基础数据与设计依据，因此将直接决定后续研究与设计的可靠性和有效性。故在该研究阶段，要尽可能保证用户情感信息与数据的真实性与准确性。其研究思路分为两个阶段：（1）产品色彩信息挖掘，在这一阶段需从多方渠道获取目标产品图片样本与文本信息，并依据色彩直方图、色彩集、色彩聚合向量法、K-Means 聚类等方法对其进行色彩提取与聚类筛选，最终构建产品色彩数据集；（2）用户情感信息挖掘，结合相关技术手段将文本信息进行聚类筛选，构建情感意象词汇库，并结合产品色彩数据集，通过实验技术手段获取用户情感数据集，以便进一步挖掘用户色彩情感认知规律。

综上所述，产品色彩情感信息挖掘的主要目的是在考虑产品情感需求的前提下，依据用户对产品所反馈的情感需求来确定产品风格意象，一方面加强设计师与用户之间的色彩情感认知关联，缩减两者情感认知鸿沟；另一方面明确产品市场定位，提高产品研发成功率，是产品色彩情感设计研究的关键环节。

2.3 产品色彩情感关联构建

产品色彩情感设计的本质是满足用户的情感需求，而情感需求的产生则是用户体验过程中所获取的一种特殊形态，是一种具有特殊意义存在的经验。由于不同个体自身经验的差异性，这种心理感受具有非常明显的主观性与个体性，因此难以确定一个客观的体验标准。对企业来说，迎合市场需求，洞悉用户情感体验，是提升产品市场研发成功率的重要手段，如何从不同用户的个性挖掘大众的共性，探寻产品色彩特征属性与用户情感需求的映射规律，是产品色彩情感设计研究亟待解决的科学问题。因此，产品色彩情感关联的建立是产品色彩情感设计研究的核心步骤。

产品色彩情感设计是研究如何将用户情感需求与偏好转化为产品色彩设计方案的方法，其目的在于建立产品色彩与用户情感意象感知之间的关联模型，揭示并学习二者之间高度复杂、模糊的内隐性关联机制，实现二者之间的相互推导[15-17]。其难点在于如何模拟产品色彩复杂协同作用机制，揭示用户产品色彩

情感认知规律。由于情感维度本身的隐性特点决定其不易被评测，因此需借助相关技术与方法实现产品色彩设计因素与用户情感意象量化处理，再建立二者之间的联系，通过这一参数转化的方法，将用户情感信息转化为具体的产品属性用于指导设计。

产品色彩情感关联的建立有助于设计师更科学客观地了解产品色彩情感之间的复杂作用机制，其通过实现对人脑思维色彩情感认知规律的模拟，极大地减少设计过程中的认知负担与时间成本，为设计师了解市场用户需求，明晰色彩作用关系提供技术支持，进而提升产品色彩设计效率，为产品色彩情感设计的评价与生成建立基础。

2.4　产品色彩情感设计的评价与生成

由于产品色彩情感设计具有高度的不确定性、复杂性与模糊性等特征，所以产品色彩情感设计一直是工业设计领域的难点。针对这一问题，大多数学者将研究重点放在了产品色彩情感设计评价模型的构建，以评价与测量用户情感数据的动态性，在这一过程中，评价的意义不仅面向产品色彩设计的最终结果，而是构筑了“知识—评价—知识”的产品色彩设计高频率迭代化设计流程，可有效地为设计师在不同设计阶段提供评价反馈，辅助设计师准确识别并深度理解用户需求，在设计进程中客观推进设计方案，检验用户情感需求目标是否完成，从而进一步帮助设计师从用户角度提高产品色彩设计完成质量，为企业创造更大商业价值。

此外，也有部分研究人员将研究中心放在了产品色彩情感设计的生成，产品色彩情感生成设计是基于产品色彩情感关联模型，依据设计目标对设计参数进行求解的过程，产品色彩情感生成设计并不是传统的设计过程，而是针对某一特定问题所采用不同算法的组合，从而生成设计，是产品色彩情感设计研究的重要内容与关键步骤[18-19]。现阶段的产品色彩情感设计生成研究针对设计问题的不确定性、设计求解的模糊多变性，以及解空间的异构性和多样性等特征，将研究思路分为两类，一是利用计算机辅助系统，模拟自然进化迭代过程，基于进化、繁殖、杂交和适应等规则参数，制定约束生成设计[20-21]；二是通过对用户的情感认知规律（用户情感与产品色彩间的映射关系）进行深度非监督式学习，利用相应智能方法协助设计师对产品色彩进行风格迁移与生成，从而快速生成满足用户情感偏好的产品色彩设计方案，以进行合理评估与选择[22]。因此，与传统方法相比，产品色彩情感设计生成大大减轻了设计学习成本和时间成本，其设计架构的优越性，能够使产品色彩情感设计在保证质量的同时，进一步增加方案的创造性与适应性，极大地提高了产品色彩情感设计生成效率。

综上所述，产品色彩情感设计的评价与生成，在增强设计创新性、提高设计效率、节省时间成本、提升市场竞争力，以及减少设计师与用户间主观认知差异等方面均有重要作用与意义。

3　关键技术

随着信息技术的进步，产品设计进入了数字网络化制造的新阶段，智能技术与先进制造技术的深度融合，使产品色彩情感设计由最初的人的决策过渡到基于数据的决策，在这一过程中产品色彩情感设计的内容及相关技术发生了从经典方法到科学方法、再到数字智能方法的转变。

在经典方法阶段，产品色彩情感设计多数采用定性研究方法，即通过质性问卷调查、采访等方法收集产品色彩情感数据，并基于设计师的主观经验和审美，结合经典的色彩理论和设计原则来进行设计决策。然而经典方法由于过度依赖设计师的主观意见，易偏离目标用户的喜好，且质性调查流程繁琐、费时，难以量化验证设计结果。随着神经科学、心理学及计算机科学等领域的介入，产品色彩情感设计开始进入科学方法阶段，在这一阶段，产品色彩情感设计通过量化分析和生理性测量实验等手段，获取更加客观的产品色彩情感数据，并结合计算机辅助算法，模拟产品色彩情感内隐关联机制，从而实现产品色彩情感设计规律性与科学性的建模，极大地提高了产品色彩设计效率。随着深度学习技术的不断发展，网络化，适应性，数据化开始成为产品设计的关键特征，产品色彩情感设计开始进入到数字智能方法阶段，这一阶段结合了经典和科学方法的优点，定性定量统筹兼顾，运用大数据网络爬虫和自然语言处理等技术批量挖取产品色彩情感数据，并对其进行准确情感把握，以明晰产品市场风格走向和用户相应情感需求，最后结合深度学习算法自动生成产品色彩情感设计方案，极大地提高了产品色彩设计效率和准确性。下面将从技术演变角度对产品色彩情感设计的三个研究内容展开具体分析，见图 3。

3.1　用户情感信息挖掘

用户情感信息挖掘旨在通过不同方式收集、分析和识别用户在使用产品过程中的情感反馈、行为数据及隐含意象，从而更好地了解和满足用户的需求和期望，并进一步优化产品色彩设计和情感体验。用户情感信息挖掘研究技术演变主要经历了三个阶段：经典方法、生理信息测量挖掘方法，大数据集成挖掘方法。

3.1.1　经典方法

早期用户情感信息挖掘研究主要是通过图解思维、自由联想、反身访谈、正反义筛选，以及 SD 法、KJ 法、主成分分析法、因子分析法、聚类分析、秩位法等技术方法对口语报告生成的情感数据进行分析与转译，以帮助分析用户的需求，改进产品色彩设计。

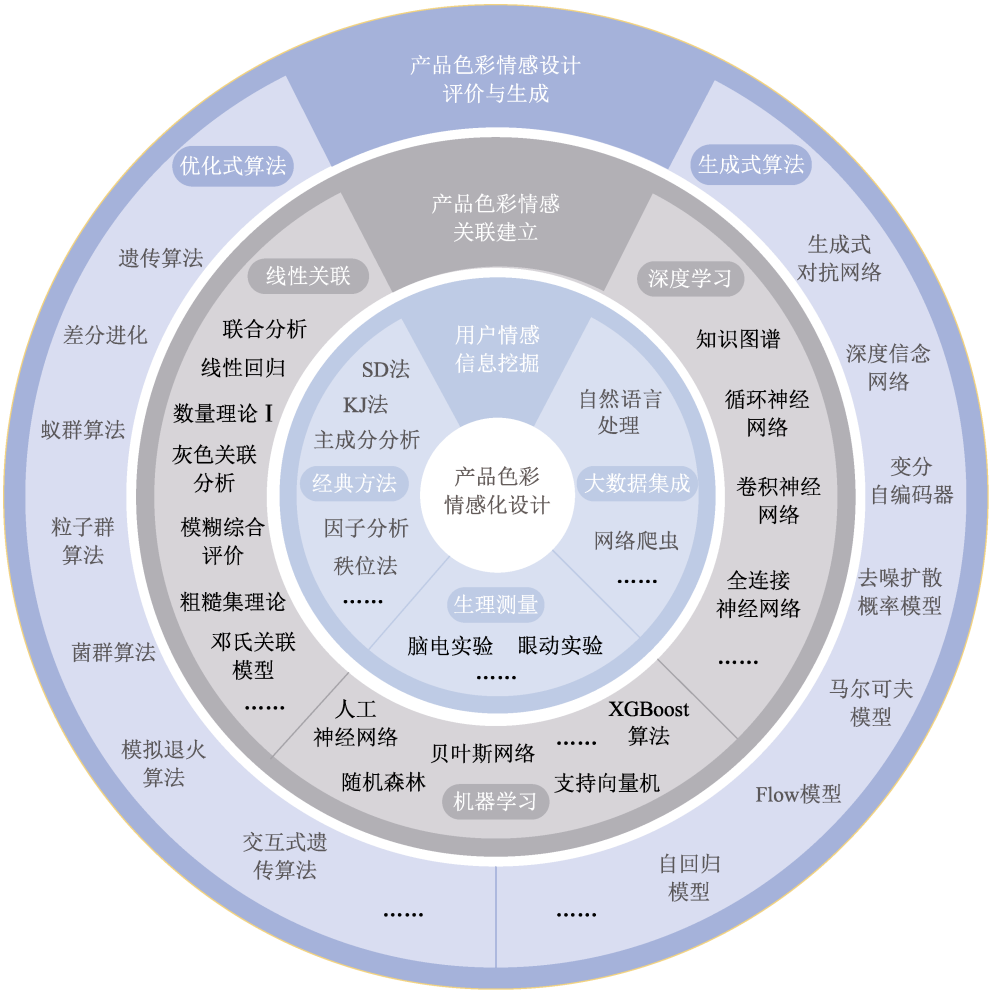

图 3 产品色彩情感设计相关技术

Fig.3 Relevant technology of product color emotion design

例如，Ding 等[23]利用因子分析法和 PA 分析法构建了用户情感意象空间，以进一步分析用户色彩情感偏好。宁廷州等[24]采用 SD 法与模糊评价进行结合，分析用户对包装机械的色彩意象偏好。陈娈 [25]通过语义分析法建立 SD 量化表，设计相对应的实验问卷，了解消费者对商务女装色彩纯度和明度的认知。曹越等[26]运用 KJ 法进行词汇属性分类，选出 24 个正反义词，对汽车内饰色彩感性意象综合评价研究。苏畅等[27]首先运用语义差异法实现情感意象词汇的量化，再利用主成分分析法将多个情感意象词汇变量转化为优选综合变量，以减少色彩开发成本。苏胜等[28]为获取代表性色彩感性意象，采用主成分分析，对最后得到的相关性较高的意象集进行降维处理。卢章平等[29]以车身色彩为研究案例，通过问卷调查获得色彩意象认知数据，再采用聚类分析、因子分析和多元尺度分析对情感意象词汇进行整合与提炼。杨冬梅等[30]采用相关性分析、因子分析、聚类分析等方法解析色彩意象的测量结果，得出体现老年偏好的产品色彩意象关键词，并将其作为评价因素。

综上所述，这些方法能够更好地触及用户情感，明确市场需求动向，然而由于用户对情感意象的描述具有歧义性和主观性，因此存在情感信息表达偏误、不完整和多变更等问题，最终导致用户情感信息挖掘充满了多变性和含混性，以及更多的模糊性与不确定性。因此，为提升研究过程的客观性与可靠性，研究人员开始引入客观的生理情感测量及量化手段来获取用户情感意象数据。

3.1.2 生理信息测量方法

生理测量法是一种通过测量人体生理反应获取情感信息的方法，通过测量眼动、脑电波等生理指标了解用户的情感状态，提供客观、实时、准确的情感信息。生理测量法可以融合评价者的生物特征量减少产品评价的主观性，提高产品评价可信度，避免人工标注数据时出现主观性、不准确性等问题，常用的生理信息测量方法有眼动、脑电等方面研究。

例如：在眼动测量方面，Wu 等[31]通过使用眼动跟踪技术来确定特定颜色对人们产品偏好的影响。Hua 等[32]基于眼动跟踪技术从动画图像中提取动态色彩构建产品色彩样本库，并在此基础上，建立了基于 MIP 的儿童购物车产品色彩决策模型，为设计师在色彩设计中提供了更广泛的色彩来源。孙博文等[33]

通过眼动实验从色彩的关系层面、分类层面、用途层面对车辆人机界面色彩要素进行客观分析与主观评价，确定不同色彩对人们产品情感偏好的影响。王秋惠等[34]基于眼动实验，结合单因素方差分析与相关性分析不同年龄段用户对服务机器人色彩设计的视觉认知是否存在差异。史庆春等[35]以抛光机为研究对象，对色彩与造型特征要素的意象尺度进行眼动追踪测试，通过分析参数变化，找到最符合意象定位的特征要素。

在脑电测量方面，Ding 等[36]采用主观行为实验和客观脑电实验对情绪进行量化，表征不同色系和双色色调关系下产品色彩设计方案的情绪反应，确定用户情感认知加工的内在生理机制。Ding 等[37]运用脑电情感测量实验量化用户的情感状态，获得与情感状态相关的客观生理数据。Sugiono 等[38]利用脑电实验对用户脑信号进行探索，从产品购买前，使用中和体验后三个阶段量化产品色彩选择中的情感因素。邓雅倩等[39]运用脑电实验获取产品色彩情感数据并结合行为数据进行异常值剔除与正向归一化处理，获得标准化数据，进而得到不同情感意象下的最佳色彩样本排序。此外，也有基于多模态相结合的生理信息测量研究，例如：丁满等[40]通过内隐测量技术同步展开眼动、脑电及行为实验，获取与用户情感意象相关的主客观数据。Zhu 等[41]结合脑电实验与眼动实验，计算情感偏好与产品色彩、造型特征之间的相关性，量化用户对设计模块和视觉吸引力的细粒度偏好。Ding 等[42]为探究色彩布局与色彩数量对产品色彩情感设计的影响，提出了一种基于眼动实验和事件相关电位的产品色彩情感设计方法。

综上所述，尽管基于脑电数据和眼动数据为代表的生理测量方法，能够避免被试者在产品评价阶段出现的主观性问题，可获得更为客观、直观的数据结果，但该方法会受到被试者人数及时间限制，同时被试者当天的精神状态会对结果产生直接影响。因此，难以进行大规模实验研究，进而难以建立体系庞大的数据库作为支撑，从而导致研究结果在精确度和准确性方面都存在一定的问题。

3.1.3　大数据集成挖掘方法

近年来，随着互联网的广泛普及和信息技术的高速发展，应用网络数据相关技术可以通过社交网络、电商交易网站等平台实时且高效地对大量用户情感信息进行真实、精准和多维度的获取、挖掘与分析，以大数据集成挖掘为代表的用户情感信息挖掘方法成为当前研究的热点和发展趋势。

随着用户群体与网络信息的密切互动，产品色彩情感数据逐渐变得冗余和碎片化，为准确挖掘用户潜在情感语义，需要在挖掘过程中兼具“专业化与深度化”。因此，近年来开展了大量以网络爬虫和自然语言处理为代表的大数据集成挖掘辅助产品色彩情感设计的研究。

例如，陈登凯等[43]通过 python 爬取，采集了从清代、民国、建国初期到如今电商平台中共计 1478 张布老虎、老虎帽、虎头鞋的图片，分析了民间布老虎的色彩规律。刘蓓贝等[44]从大数据的角度出发，利用数据采集技术从互联网上得到大量的原始数据，并挖掘出产品色彩设计的相关规律，进而形成一套行之有效的产品色彩设计方法。刘肖健等[45]基于大数据技术从图库中提取特征色彩，并针对提取色信息的有效应用提出改进方案。吴天宇等[46]运用质性分析法等网络大数据挖掘技术，帮助设计师扩大目标用户需求痛点提取范围，从而更有针对性地挖掘与筛选用户的色彩需求信息。张新新[47]首先运用大数据网络爬虫获取目标产品色彩样本图片与情感意象文本数据，再利用自然语义处理技术对词汇进行相关度分析，进而获得代表性产品情感意象词汇。

3.2　产品色彩情感关联建立

产品色彩情感关联建模旨在通过运用各类智能技术与方法，将产品设计特征属性与用户情感意象认知空间进行关联并建立关系模型，通过对用户情感认知形成机理的学习与应用，协助设计师快速产生能够满足用户情感认知偏好的产品设计方案，并对其进行合理评估与选择。产品色彩情感关联建立研究的发展主要经历了三个阶段：基于线性关联技术建模；基于机器学习技术的关联建模；基于深度学习技术的关联建模。

3.2.1　线性关联技术

线性关联技术是指通过样本特征的线性组合来进行预测的模型，是应用最广泛的数学模型。在产品色彩情感设计研究中，通过使用线性模型分析并解释数据间的关联性，从而建立产品色彩与用户情感意象间的关联模型，是将产品色彩情感设计问题转化为数学问题的必要步骤。线性模型形式简单、易于建模，目前该研究的方法较多，如灰色关联分析、粗糙集理论、邓氏关联模型、线性回归、联合分析、数量化理论Ⅰ、模糊综合评价等方法。

例如，丁满等[48]考虑多工作模式下的产品配色规划问题，基于灰色关联分析法建立产品方案色彩与意象之间的关联模型，并运用灰色聚类法判断产品配色方案的意象值。付淑君等[49]针对黔东南苗绣服饰色彩研究中色彩基因与用户感性需求耦合性欠佳的问题，采用多元线性回归分析建立感性意象词汇与黔东南苗绣服饰色彩组成要素之间的关联模型，构建 KCN-KE 模型。丁田妹等[50]提出一种基于粗糙集理论的方法，研究产品各部件色彩对感性意象的影响，并挖掘产品配色规则进而形成产品色彩情感关联模型。陈天宇等[51]基于 PCCS 色彩体系结合灰色关联分析在 Lab 均匀色彩空间中构建了一种产品色彩情感关联模型，

将复杂的色彩方案优选过程转换为直观明确的数值衡量，提高色彩设计效率。张琳等[52]针对产品设计过程中色彩意象评价的不确定性，建立了邓氏关联度的数学模型，将用户对产品色彩意象的主观模糊表达转化为具体的色彩意象值，从而获得更符合用户真实意象的产品色彩设计方案。Shieh 等[53]结合感性工学和粗糙集来建立牙刷色彩、造型与情感意象之间的关联关系，以探索产品评估过程中形状和颜色对知觉的影响，帮助设计师处理感性词语的不精确性和非线性问题。

利用线性关联技术，可有效建立色彩特征与情感意象之间的关联关系，然而用户的情感信息是一种非线性且复杂的数据，采用线性关联模型难以对其内在复杂作用关系进行模拟，进而难以实现对情感意象的准确识别和预测。因此，为更有效地捕捉被试者对产品色彩的情感意象，提供更加科学和有针对性的策略和建议，多数学者开始引用具有非线性关联的机器学习算法进行研究。

3.2.2 机器学习

随着产品色彩情感设计研究的深入，需处理的数据量大大增加，数据间的关联性逐渐变得复杂，并且显现出非线性特征。机器学习算法能够通过模拟人类的学习行为，对大量情感数据和设计数据进行归纳总结并不断修正优化，从而建立有效的非线性推理机制，以实现对产品色彩与用户情感间高维、复杂、模糊的双向推理，因此被广泛应用于产品色彩情感建模研究中。其常用方法主要有人工神经网络、贝叶斯网络、支持向量机、随机森林算法、XGBoost 等。

例如，刘捷[54]采用支持向量机（SVM）建立外观配色意象关联模型，以完成对意象值表征的分类。李孟山等[55]为获取产品色彩意象与期望色彩之间的复杂映射关系，结合人工神经网络、混沌理论与群体智能算法进行建模,通过模型的训练来建立输入与输出数据之间的关联关系，并测试得到基于用户意象的期望色彩。杨冬梅等[56]针对机械装备色彩意象认知复杂性问题，建立基于 DE-BP 算法的感性意象与产品色彩特征关联模型，以更好地满足机械装备的色彩设计需求。Ding 等[57]利用 XGBoost 算法和实验数据，建立了基于 XGBoost 的产品色彩情感关联模型，该模型能够有效地揭示用户色彩情感认知规律，帮助设计师进行色彩方案决策。丁满等[58]为解决色彩布局形式而导致的产品色彩设计方案片面性问题，利用 BP 神经网络建立不同布局形式的产品色彩情感关联模型，以指导设计。Ding 等[59]为考虑多产品特征属性对产品情感意象的综合影响，运用贝叶斯网络构建产品色彩、造型特征与情感意象间的关联关系。Qiao 等[60]基于情绪激发实验和 BP 神经网络，分析消极情绪与色彩之间的非线性映射关系，预测显著性消极情绪的褪色与刺激颜色结构，为公共危机时期视觉传达的色彩设计提供了参考。

综上所述，基于机器学习的产品色彩情感意象关联模型能够更加有效的处理复杂因素之间的非线性关联关系，但其仍存在一些问题，传统的机器学习算法难以摆脱对数据集的依赖，且对异常值过于敏感，这导致在学习过程中需要大量的时间和计算资源，大大增加了设计成本。

3.2.3 深度学习

深度学习是一种基于人工神经网络的机器学习技术，其通过模仿人类大脑如何工作来搭建组合高度抽象的数据表示。深度学习与传统的机器学习算法相比，能够更好地处理大规模数据和非结构化数据，具备良好的扩展性，可以同时处理多项任务。大量研究表明，深度学习在用户情感意象识别上具有明显的优越性，其学习过程越来越接近用户和设计师的认知思维，这为产品色彩情感设计研究提供了新的方法和思路。常见的深度学习算法主要包括：卷积神经网络、循环神经网络、自编码器、深度信念网络，以及全连接神经网络等，同时也包含了常规的机器学习概念，如梯度下降和反向传播等。

例如，Guo 等[61]针对色彩和谐性和用户情感偏好两个优化目标，基于径向基函数神经网络构建产品色彩情感关联模型，为后续产品色彩情感优化设计提供参考。Ding 等[62]利用卷积神经网络建立产品颜色与用户情感意象之间的复杂关联模型，开发了产品色彩设计系统。Guo 等[63]以一种基于色彩数据增强的半监督学习方法 Color-SSL 来实现对汽车情感的标注，创新性地将基于色彩信息的人类对产品的情感关联关系引入到 SSL 过程中。朱天飞[64]为进一步系统化解读产品色彩情感，采用卷积神经网络建立产品色彩与造型特征与情感意象间的关联关系，探明了各领域不同种类产品所蕴含的情感异同。

综上所述，与传统的机器学习相比，深度学习算法具有更强的适应性，具备更高的准确度与预测效果，能够处理更加庞大复杂的数据集，改善和加速产品设计流程。因此，深度学习算法在产品色彩情感设计研究领域具有更加广泛的应用前景和发展空间。

3.3 产品色彩情感设计评价与生成

产品色彩的情感意象评价旨在以心理学为基础，依据人们对色彩的感知和情感反应，对产品选择中的色彩方案进行评价和有效指导。产品色彩情感生成设计是一种以设计目标为驱动，利用人工智能技术实现的产品色彩设计方法。二者相辅相成，能够按照目标产品色彩设计规律进行方案评鉴与创造性生成，从而生成大量符合用户情感需求的产品色彩情感设计方案，极大地扩展设计库中方案的基数，进而激发设计者的灵感，提高设计效率。在产品色彩情感设计生成的发展阶段主要经历了从优化式算法到生成式算法的转变。

3.3.1　优化式算法

智能优化算法是一种通过模拟大自然优胜劣汰的规则，对方案进行最优解搜索的算法或理论。与传统的优化算法相比，智能优化算法适用范围广，寻优能力强。常用的智能优化算法有遗传算法、群智能算法、交互式遗传算法、蜂群算法、蚁群算法等。

例如，Ding 等[65]为探究不同色彩布局对产品色彩情感设计的影响，首先基于语义差分法和反向传播神经网络构建用户情感感知与产品色彩特征的关联评价模型，并结合 K 值临近算法推荐色彩布局结构，最后采用遗传算法对最优产品配色方案进行求解。刘征宏等[66]运用线性回归法构建产品情感意象词汇与单一色彩间的关联评价模型，并在此基础上以色彩贡献因子和用户评价值为依据构建适应度函数，以色彩调和度评价为约束条件，结合遗传算法进行配色方案的推进以及优化，直至获得用户满意的配色方案。郭伏等[67]首先运用灰色关联模型构建产品色彩情感设计评价模型；其次结合美学评估方法对色彩进行一致性评价；最后利用遗传算法辅助设计师解决产品色彩搭配的最优化问题，为计算机辅助色彩设计提供了一种新的思维模式和方法。Ding 等[68]针对一类产品外观动态变化、不同操作模式下外观不同的工业产品色彩设计问题，首先通过心理测量法获取用户感性信息数据；其次结合 GT 法与动态规划法建立产品动态色情感关联评价模型；最后利用遗传算法对模型方案进行优化选取。Ding 等[69]首先运用灰色关联理论构建产品色彩情感关联评价模型，再运用非支配排序遗传算法对目标产品的多情感配色方案进行优化设计。Ding 等[70]为探究产品形状特征对用户色彩形象感知空间所形成的影响机制，采用支持向量机回归技术构建了产品色彩情感评价模型，最后通过遗传算法对色彩方案进行优化。

综上所述优化算法可提高设计效率，缩短设计周期，能够从更客观的角度和从大量的色彩方案中寻优，满足用户的情感需求偏好。然而尽管如此，由于优化算法是基于搜索过程逐步判断最优解的方法，所以容易出现提前终止，陷入局部最优解等问题，致使算法受限于其本身的参数设置。因而越来越多的研究者将产品色彩情感设计研究的重心转换到扩展性更强，鲁棒性更高的生成式算法研究。

3.2.2　生成式算法

生成式算法是在计算机辅助下，通过学习大量的方案数据及自身的设计规律自主生成新方案的算法。设计师根据用户偏好，设定基本的优化目标、约束条件，智能化地筛选、优化方案，有效地提高设计方案生成的数量及质量。常用的生成式算法有生成式对抗网络，深度信念网络，隐马尔可夫模型和自回归模型，变分自编码器（VAE），去噪扩散概率模型（EM），Flow 模型等。

例如，丁满等[71]针对产品色彩智能设计系统生成方案创新性不足的问题，提出一种应用生成对抗网络来实现产品色彩智能设计的方法。首先将收集到的优秀产品色彩设计方案作为学习样本，通过 GAN 训练建立产品色彩方案生成器；其次利用 BP 神经网络建立产品色彩设计方案评价器；最后结合生成器和评价器搭建产品色彩设计运行系统，获得符合意象需求的产品色彩设计方案。丁满等[72]基于 GoogleNet 建立产品色彩情感评价模型，并基于此构建产品色彩情感数据集，然后通过 C-DCGAN 创新性生成符合用户情感偏好的色彩图像，提高了设计方案的多样性与创新性。Li 等[73]提出了一种产品概念设计智能生成方法，利用深度残差网络构建产品色彩情感评价模型，并通过 GAN 生成满足用户情感需要的概念图像，为设计人员提供创作灵感。Quan[74]等针对用户偏好难以捕捉的问题，提出了一种将感性工学与深度学习结合的产品设计方案自动生成方法，通过 BPNN 建立产品色彩与情感意象关联评价模型，并使用 CNN 与风格迁移对色彩造型特征进行重构合并，实现生成保持目标造型又满足风格意象的新方案。

综上所述，基于生成式算法的产品色彩情感设计极大地缩短了新方案的开发时间，提高了设计效率，能够大幅度扩展设计师的创造能力，在产品色彩情感设计生成领域极具潜力。目前基于生成式产品色彩情感设计研究相对较少，是未来产品色彩情感设计研究的重要发展方向。

4　展望

大数据信息时代的来临是机遇亦是挑战，如何结合大数据、深度学习等智能优化算法，将产品色彩情感设计融入“人工智能+领域知识”的生长模式，为智能时代下产品色彩情感设计提供统一的理论模型与智能技术方法是现阶段产品色彩情感设计的一大挑战。因此，本文结合现阶段产品色彩研究对象和相关热点技术，对产品色彩情感设计的未来发展趋势进行预测与解析。

4.1　基于深度学习的产品色彩情感生成式设计研究

新一代人工智能的出现，使产品色彩情感设计从过去的主观经验转变为客观科学，致使近年来基于深度学习算法的生成模型成为备受瞩目的新兴技术。将其应用于产品色彩情感设计，可自动地从大量数据中学习规律和潜在特征，且不再限制于文本数据输入的特点，可以更加轻易地处理高维数据。目前大多数产品色彩情感设计方法为黑箱模型，难以精确模拟内部色彩复杂协同作用关系，而厘清色彩作用机制，对实现色彩情感的有效关联意义重大。因此，基于可解释性的深度学习生成式模型将是未来产品色彩情感设计的一大热点与趋势。

4.2 基于可视化大数据技术的产品色彩情感设计研究

随着信息化和数字经济的不断发展，基于数据驱动的可视化技术，成为近年来智能化时代催生的一种新型思考方式和方法论。该技术利用大数据网络爬虫，自然语义处理等技术构建产品色彩反馈系统，将人类视觉体验的反馈与大数据分析相结合，能有效应对市场上产品色彩风格环境的变化，实时扫描和修正产品市场风格走向，并利用可视化数据分析工具，将色彩情感数据以图表、图形、资料库等多种形式构建端到端的色彩管理，实现用户、设计师、企业不同层次间的沟通，从而进一步优化产品色彩情感设计流程，大大提升产品色彩情感设计效率与质量。因此，在未来产品色彩情感设计的发展中，色彩大数据的可视化的呈现将成为一个重要发展趋势。

4.3 基于虚拟现实增强技术的产品色彩情感设计研究

虚拟现实增强技术是将虚拟现实技术与现实环境相融合的一种新型技术，其通过使用头戴式设备，手持设备或者其他感知设备将虚拟场景和现实世界进行连接，以增强现实世界的感知体验。在以往的传统产品色彩情感设计过程中，用户无法直接感受到产品色彩的实际效果，难以对其内隐的色彩情感进行挖掘，而虚拟现实增强技术的出现为产品色彩情感数据的挖掘与处理提供了新方向。一方面利用增强现实技术将虚拟世界与真实世界进行互动结合，从多维角度分析产品色彩数据与用户情感需求，更深层次的理解用户对色彩的不同映像反应；另一方面科技与虚拟现实增强技术开发智能产品色彩分析系统，既可根据已有数据快速生成方案，也能够自动绘制程序更新应用场景，及时响应用户反馈结果。综上所述，虚拟现实增强技术的出现，必将成为产品色彩情感设计研究带来更加有益的创新与价值。

5 结语

产品色彩情感设计研究的探索与开发过程是设计学、心理学、认知科学、工程学、信息科学、人工智能等多学科领域的交叉、融合与创新。其整合了产品色彩要素，用户情感需求和人工智能技术，将其应用于产品规划、设计、制造及推销过程，实现语言和视觉的交流目标，最终达到产品色彩与用户的最佳情感共鸣。人工智能技术领域的快速发展，加速了产品色彩情感设计与智能技术的深度融合，为深入揭示人与产品、社会、环境之间的复杂有机联系、提升用户情感体验、满足用户个性化情感需求提供了有效途径。

鉴于此，本文对产品色彩情感设计的概念进行定义与分析，总结出产品色彩情感设计内涵的三个层次，并从产品色彩情感设计研究内容与知识体系出发，分析了用户情感信息挖掘，产品色彩情感意象关联建立及产品色彩情感设计评价与生成三个研究内容关键技术的研究现状，最后总结了产品色彩情感设计现阶段研究热点，并展望未来发展趋势。本文从技术演变角度对产品色彩情感设计研究领域进行了较为全面的梳理与归纳，形成了产品色彩情感设计全面的知识视图与研究轨迹，为今后的产品色彩情感设计研究提供应用技术与理论参考，以促进该领域未来的良性发展。

参考文献：

[1] 薛塬，臧冀原，孔德婧，等. 面向智能制造的产业模式演变与创新应用[J]. 机械工程学报，2022，58(18): 303-318.
XUE Yuan, ZANG Ji-yuan, KONG De-jing, et al. Evolution and Innovative Application of Industrial Model Oriented to Intelligent Manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(18): 303-318.

[2] 李柏姝，张刚，黄燕飞. 基于产品全生命周期的产品规划建模与应用[J]. 机械工程学报，2017，53(19): 201-208.
LI Bai-shu, ZHANG Gang, HUANG Yan-fei. Product Planning Decision Based on Product Life Cycles: Modeling and Application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(19): 201-208.

[3] 冯毅雄，娄山河，王绪鹏，等. 面向性能的定制产品感性意象评价方法研究[J]. 机械工程学报，2020，56(9): 181-190.
FENG Yi-xiong, LOU Shan-he, WANG Xu-peng, et al. Research on Performance-Oriented Perceptual Image Evaluation Method for Cus Tomized Products[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(9): 181-190.

[4] HSIAO S W, TSAI C J. Transforming the Natural Colors of an Image into Product Design: A Computer-Aided Color Planning System Based on Fuzzy Pattern Recognition[J]. Color Research & Application, 2015, 40(6): 612-625.

[5] ZHANG X X, YANG M G, SU JI N, et al. Research on Product Color Design Decision Driven by Brand Image[J]. Color Research & Application, 2020, 45(6): 1202-1216.

[6] 丁满，程语，黄晓光，等. 感性工学设计方法研究现状与进展[J]. 机械设计, 2020, 37(1): 121-127.
DING Man, CHENG Yu, HUANG Xiao-guang, et al. Status and Progress of Kansei Engineering Design Method[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(1): 121-127.

[7] 丁满，孙伟，马沁怡. 基于色彩空间分布形式的产品配色意象评价[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 2010, 16(3): 491-495.
DING Man, SUN Wei, MA Qin-yi. Evaluation Method for Product Color Combination Image Based on Color Spatial Layout[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(3): 491-495.

[8] 丁满，程语. 产品色彩感性工学设计研究现状[J]. 机械设计, 2022, 39(7): 122-128.

DING Man, CHENG Yu. Research Status of Product Color Design Based on Kansei Engineering[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(7): 122-128.

[9] 贾林海. 从设计的技术研究到设计的哲学研究[J]. 自然辩证法研究, 2016, 32(2): 29-34.
JIA Lin-hai. From the Technological Research on Design to the Philosophical Research on Design[J]. Studies in Dialectics of Nature, 2016, 32(2): 29-34.

[10] NGUYEN C H, RITSCHEL T, MYSZKOWSKI K, et al. 3D Material Style Transfer[J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(2pt2): 431-438.

[11] WANG Ming-ru, CHENG Xu-feng, HE Zi-xuan. Research on Multiple Affective Responses Design of Product Based on Kansei Engineering and TOPSIS-AISM[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 1-12.

[12] 孙毅，胡洪江. 意象隐喻理论演进——经典与传承[J]. 外文研究, 2022, 10(3): 1-12, 105.
SUN Yi, HU Hong-jiang. Evolution of Image Metaphor Theory—Classics and Inheritance[J]. Foreign Studies, 2022, 10(3): 1-12, 105.

[13] ZHANG Xin-xin, YANG Ming-gang. Color Image Knowledge Model Construction Based on Ontology[J]. Color Research & Application, 2019, 44(4): 651-662.

[14] LAOHAKANGVALVIT T, IIDA I, CHAROENPIT S, et al. Measurements and Evaluations of Kawaii Products by Eye Tracking[M]//Ohkura M. Kawaii Engineering. Singapore: Springer, 2019: 125-140.

[15] ZHANG Xin-xin, LI Yue-ying, PEI Hui-ning, et al. Research on Chaos of Product Color Image System Driven by Brand Image[J]. Multimedia Tools and Applications, 2023, 82(16): 24425-24444.

[16] DING Man, SUN Wei, ZHANG Xu. Computer-Aided Product Colour Planning for Multi-Working Modes Product Using the Synthesised Evaluation Method and Difference Evolution[J]. Journal of Engineering Design, 2011, 22(10): 701-719.

[17] 丁满，孙伟，徐江，等. 考虑色彩意象不明确的产品色彩模糊优化设计[J]. 机械工程学报，2011，47(12): 185-190.
DING Man, SUN Wei, XU Jiang, et al. Product Color Fuzzy Optimum Design Considering Color Image Uncertainty[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(12): 185-190.

[18] DING Man, DONG Wei. Multi-Working Mode Product Color Planning Using Evolutionary Algorithm and Swarm Intelligence[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2013, 10(12): 2906-2911.

[19] DING M, BEN N, DONG W, et al. Bacterial Foraging for Product Color Planning[J]. Journal of Pure & Applied Microbiology, 2013, 7(3): 1995-2001.

[20] 丁满，亢婧璇，李美. 面向品牌延伸识别的产品色彩设计研究[J]. 包装工程, 2021, 42(18): 204-212.
DING Man, KANG Jing-xuan, LI Mei. Product Color Design for Brand Extension Recognition[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(18): 204-212.

[21] DING Man, CHEN Han-ning, LIN Na, et al. Dynamic Population Artificial Bee Colony Algorithm for Multi-Objective Optimal Power Flow[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2017, 24(3): 703-710.

[22] JI Yuan-wei, CHEN Yu-miao. Research on Generative Design of Car Side Colour Rendering Based on Generative Adversarial Networks[C]//Duffy VG, Rau PLP. International Conference on Human-Computer Interaction. Cham: Springer, 2022: 420-434.

[23] DING Man, DONG Wei, YANG Chih-Chieh. Product Color Design Based on Multi-Emotion[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(7): 2079-2084.

[24] 宁廷州，葛美芹. 考虑用户共识的包装机械色彩意象模糊优选方法[J]. 包装工程, 2020, 41(4): 171-176.
NING Ting-zhou, GE Mei-qin. Fuzzy Evaluation Method for Packaging Machinery Color Image Design by Considering Users' Consensus[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(4): 171-176.

[25] 陈娈. 基于消费者认知心理的商务女装色彩研究[D]. 上海：东华大学, 2018.
CHEN Luan. Research on color of business women's wear based on consumer's cognitive psychology[D]. Shanghai: Donghua University, 2018.

[26] 曹越，苏畅，魏君，等. 汽车内饰色彩感性意象综合评价研究[J]. 机械设计, 2019, 36(3): 129-133.
CAO Yue, SU Chang, WEI Jun, et al. Synthetic Evaluation Research on Kansei Images of Automotive Interior Color[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(3): 129-133.

[27] 苏畅，付黎明，魏君，等. 基于感性工学和主成分分析的车身色彩设计[J]. 吉林大学学报(工学版)，2016, 46(5): 1414-1419.
SU Chang, FU Li-ming, WEI Jun, et al. Design Method in Exterior Color Based Kansei Engineering and Principal Component Analysis[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(5): 1414-1419.

[28] 苏胜，宋志强，顾森，等. 军用舱室色彩感知下配色方法研究[J]. 西安工业大学学报, 2022, 42(1): 96-104.
SU Sheng, SONG Zhi-qiang, GU Sen, et al. Research on Color Matching Method under Military Cabin Color Perception[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2022, 42(1): 96-104.

[29] 卢章平，顾青青，李明珠，等. 汽车车身色彩意象认知研究[J]. 包装工程, 2014, 35(20): 20-24.
LU Zhang-ping, GU Qing-qing, LI Ming-zhu, et al. Image Cognition of Automobile Color[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(20): 20-24.

[30] 杨冬梅，张健楠，丁满，等. 基于感性意象的老年产品色彩设计方法[J]. 机械设计, 2018, 35(3): 110-113.
YANG Dong-mei, ZHANG Jian-nan, DING Man, et al. Color Design Method for Elderly Products Based on Kansei Image[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(3): 110-113.

[31] WU Bo, ZHU Yi-shui, YU Ke-ping, et al. The Effect of Eye Movements and Cultural Factors on Product Color Selection[J]. Human-Centric Computing and Information Sciences, 2020, 10(1): 1-14.

[32] HUA Yin-hong, NI Jian-lin, LU Hong-lei. An Eye- Tracking Technology and MLP-Based Color Matching Design Method[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 1294.

[33] 孙博文，杨建明，孙远波，等. 基于眼动实验的车辆人机界面色彩设计研究[J]. 包装工程，2019，40(2): 23-30.
SUN Bo-wen, YANG Jian-ming, SUN Yuan-bo, et al. Color Design of Human Vehicle Interaction Based on Eye-Tracking Experiment[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(2): 23-30.

[34] 王秋惠，陈微. 老龄服务机器人色彩设计的视觉认知绩效研究[J]. 包装工程, 2021, 42(24): 175-180.
WANG Qiu-hui, CHEN Wei. Visual Cognitive Performance of Color Design of Service Robot for the Elderly[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(24): 175-180.

[35] 史庆春，孙金红，王健. 基于眼动追踪技术的抛光机造型设计与色彩优选[J]. 机械设计，2016，33(8): 105-108.
SHI Qing-chun, SUN Jin-hong, WANG Jian. Modeling Design and Color Selection of Polishing Machine Based on Eye Tracking Technology[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(8): 105-108.

[36] DING Man, DING Ting-ting, CHEN Xi, et al. Using Event-Related Potentials to Identify User's Moods Induced by Product Color Stimuli with Different Attributes[J]. Displays, 2022, 74: 102198.

[37] DING Man, QIN Kai, QIN Hao-cheng, et al. Using Event-Related Potentials to Identify User Emotion Caused by Product Color Attribute[J]. Displays, 2023, 79: 102460.

[38] SUGIONO S, PUTRA A S, RENALDI P, et al. A New Concept of Product Design by Involving Emotional Factors Using EEG: A Case Study of Computer Mouse Design[J]. Acta Neuropsychologica, 2021, 19(1): 63-80.

[39] 邓雅倩，林丽，郭主恩，等. 脑电结合行为指标的汽车内饰色彩感性评价[J]. 机械科学与技术，2023，42(5): 747-754.
DENG Ya-qian, LIN Li, GUO Zhu-en, et al. Evaluation of Color Sensibility of Automobile Interior by EEG Combined with Behavioral Indicators[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023, 42(5): 747-754.

[40] 丁满，丁婷婷，宋美佳，等. 基于内隐测量和 BP 神经网络的产品色彩情感化设计[J]. 计算机集成制造系统, 2023, 29(2): 616-627.
DING Man, DING Ting-ting, SONG Mei-jia, et al. Product Color Emotional Design Method Based on Implicit Measurement and BP Neural Network[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2023, 29(2): 616-627.

[41] ZHU Si-yu, QI Jin, HU Jie-hui, et al. A New Approach for Product Evaluation Based on Integration of EEG and Eye-Tracking[J]. Advanced engineering informatics, 2022(52):52.

[42] DING Man, SONG Mei-jia, PEI Hui-ning, et al. The Emotional Design of Product Color: An Eye Movement and Event-Related Potentials Study[J]. Color Research & Application, 2021, 46(4): 871-889.

[43] 陈登凯，王瑶. 基于 MCCQ 的民间布老虎色彩特征提取及设计实践[J]. 包装工程, 2019, 40(24): 45-49.
CHEN Deng-kai, WANG Yao. Color Feature Extraction of Folk Cloth Tigers and Design Practice Based on MCCQ Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(24): 45-49.

[44] 刘蓓贝，张融，陈旭，等. 基于大数据的产品色彩设计[J]. 包装工程, 2019, 40(14): 228-235.
LIU Bei-bei, ZHANG Rong, CHEN Xu, et al. Product Color Design Based on Big Data[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(14): 228-235.

[45] 刘肖健，冯玉梅，张幂，等. 基于大数据的配色方案优化约束空间建构[J]. 包装工程, 2022, 43(20): 49-56.
LIU Xiao-jian, FENG Yu-mei, ZHANG Mi, et al. Construction of Constraint Space for Color Scheme Optimization Based on Big Data[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(20): 49-56.

[46] 吴天宇，赵祎乾，李亚军，等. 基于用户需求分类的产品色彩情感体验设计[J]. 包装工程，2022，43(16): 209-217.
WU Tian-yu, ZHAO Yi-qian, LI Ya-jun, et al. Emotional Experience Design of Product Color in User Needs Classification[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(16): 209-217.

[47] 张新新. 产品色彩意象系统的混沌性研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2020.
ZHANG Xin-xin. Study on Chaos of Product Color Image System[D].Shanghai: East China University of Science and Technology, 2020.

[48] 丁满，孙伟，马铁强. 多工作模式产品配色意象的灰色评价方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2009，21(12): 1857-1862.
DING Man, SUN Wei, MA Tie-qiang. Gray Evaluation Method for Color Combination Image of Multiple Working Modes Product[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(12): 1857-1862.

[49] 付淑君，吕健，谢庆生，等. 基于色彩网络的黔东南苗绣服饰色彩意象研究[J]. 毛纺科技，2022，50(10): 84-93.
FU Shu-jun, LYU Jian, XIE Qing-sheng, et al. Research on the Color Image of Miao Xiu Clothing in Qiandongnan Based on Color Network[J]. Wool Textile Journal, 2022, 50(10): 84-93.

[50] 丁田妹，车建明. 基于粗糙集的产品色彩意象规则挖掘[J]. 机械设计, 2017, 34(4): 109-113.
DING Tian-mei, CHE Jian-ming. Rules Mining of Product Color Image Based on Rough Set[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(4): 109-113.

[51] 陈天宇，肖旺群. 基于 PCCS 色彩体系和灰色关联分析的产品色彩设计方法[J/OL]. 包装工程, 2023: 1-12.
CHEN Tian-yu, XIAO Wang-qun. Product Color Design Methods Based on PCCS Color System and GRA[J/OL]. Packaging Engineering, 2023: 1-12.

[52] 张琳，赵静. 产品色彩设计意象评价的数理方法研究

[J]. 机械设计, 2014, 31(12): 108-111.
ZHANG Lin, ZHAO Jing. Mathematical Method Study on Image Evaluation of Product Color Design[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(12): 108-111.

[53] SHIEH M D, YEH Y E, HUANG C L. Eliciting Design Knowledge from Affective Responses Using Rough Sets and Kansei Engineering System[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2016, 7(1): 107-120.

[54] 刘捷. 基于产品功能的外观配色人工智能设计方法研究[J]. 长春师范大学学报, 2021, 40(10): 38-44.
LIU Jie. Research on Artificial Intelligence Design Method of Appearance Color Matching for Product Function[J]. Journal of Changchun Normal University, 2021, 40(10): 38-44.

[55] 李孟山，徐秋莹，高德民，等. 融合混合智能方法和多用户意象的色彩决策系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(11): 2091-2099.
LI Meng-shan, XU Qiu-ying, GAO De-min, et al. Color Decision System Based on Hybrid Intelligent Method and Multi-Users' Images[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2017, 29(11): 2091-2099.

[56] 杨冬梅，刘佳鑫，张健楠，等. 基于 DE-BP 的机械装备配色设计评价方法[J]. 机械设计与研究，2021, 37(6): 204-208, 212.
YANG Dong-mei, LIU Jia-xin, ZHANG Jian-nan, et al. Color Matching Design Evaluation Method of Mechanical Equipment Based on DE-BP[J]. Machine Design & Research, 2021, 37(6): 204-208, 212.

[57] DING Man, ZHAO Ling-ying, PEI Hui-ning, et al. An XGBoost Based Evaluation Methodology of Product Color Emotion Design[J]. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2021, 15(6): JAMDSM0075.

[58] 丁满，李紫君，裴卉宁，等. 可适应布局形式变化的产品色彩设计研究[J]. 包装工程, 2021, 42(16): 103-112.
DING Man, LI Zi-jun, PEI Hui-ning, et al. Product Color Design Adapting to the Change of Layout Form[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(16): 103-112.

[59] DING Man, ZHAO Ling-ying, SUN Ming-yu, et al. An ISM-BN-GA Based Methodology for Product Emotional Design[J]. Displays, 2022, 74: 102279.

[60] QIAO Yi-dan, CHEN Deng-kai, SUN Yi-wei, et al. An Intelligent Color Design Method for Visual Communication Design for Public Crisis[J]. Color Research & Application, 2023, 48(1): 115-138.

[61] GUO Fu, LI Feng-xiang, NAGAMACHI M, et al. Research on Color Optimization of Tricolor Product Considering Color Harmony and Users' Emotion[J]. Color Research & Application, 2020, 45(1): 156-171.

[62] DING Man, CHENG Yu, ZHANG Jin-yong, et al. Product Color Emotional Design Based on a Convolutional Neural Network and Search Neural Network[J]. Color Research & Application, 2021, 46(6): 1332-1346.

[63] GUO Zhu-en, LIN Li, LIU Bao-qi, et al. Car Emotion Labeling Based on Color-SSL Semi-Supervised Learning Algorithm by Color Augmentation[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2023, 2023: 1-16.

[64] 朱天飞. 结合深度学习的产品设计情感化研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
ZHU Tian-fei. Research on Emotional Product Design Combined with Deep Learning[D].Tianjin: Tianjin University, 2020.

[65] DING Man, DONG Wei. Product Color Emotional Design Considering Color Layout[J]. Color Research & Application, 2018: col.22338.

[66] 刘征宏，鄢吉多，林芸，等. 基于感性工学和交互式遗传的产品配色设计方法[J]. 包装工程, 2019, 40(20): 88-94.
LIU Zheng-hong, YAN Ji-duo, LIN Yun, et al. Product Color Design Method Based on Kansei Engineering and Interactive Genetic Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(20): 88-94.

[67] 郭伏，田甜，李森，等. 基于用户感性意象的产品配色研究[J]. 工业工程与管理, 2011, 16(6): 89-93.
GUO Fu, TIAN Tian, LI Sen, et al. Product Color Matching Research Based on Consumer's Perceptual Image[J]. Industrial Engineering and Management, 2011, 16(6): 89-93.

[68] DING Man, BAI Zhong-hang, ZHANG Jin-zhu, et al. Dynamic Color Design for Multimodal Industrial Products Based on Genetic Algorithm[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2020, 38(1): 293-302.

[69] DING Man, DONG Wei. Multiemotional Product Color Design Using Gray Theory and Nondominated Sorting Genetic Algorithm-III[J]. Color Research & Application, 2020, 45(1): 142-155.

[70] DING Man, BAI Zhong-hang. Product Color Emotional Design Adaptive to Product Shape Feature Variation[J]. Color Research & Application, 2019, 44(5): 811-823.

[71] 丁满，李明惠，赵芳华，等. 基于生成对抗网络的产品色彩智能设计方法[J]. 机械设计, 2019, 36(11): 133-138.
DING Man, LI Ming-hui, ZHAO Fang-hua, et al. Product Color Intelligent Design Method Based on Generative Adversarial Network[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(11): 133-138.

[72] 丁满，袁云磊，张新新，等. 基于深度学习的产品色彩情感化设计[J]. 计算机集成制造系统，2023, 29(5): 1647-1656.
DING Man, YUAN Yun-lei, ZHANG Xin-xin, et al. Emotional Design of Product Color Based on Deep Learning[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2023, 29(5): 1647-1656.

[73] LI Xiong, SU Jian-ning, ZHANG Zhi-peng, et al. Product Innovation Concept Generation Based on Deep Learning and Kansei Engineering[J]. Journal of Engineering Design, 2021, 32(10): 559-589.

[74] QUAN Hua-feng, LI Shao-bo, HU Jian-jun. Product Innovation Design Based on Deep Learning and Kansei Engineering[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 2397.

责任编辑：陈作