

## 配色设计研究现状综述

刘肖健, 贾莹莹, 徐博群  
(浙江工业大学, 杭州 310023)

**摘要:** **目的** 简要介绍近年来配色设计研究的内容、方法和技术, 并提出一些待解决的问题及可行的相关理论。**方法** 从色彩表达模型、色彩意象和配色设计方法 3 个方面对配色设计的研究现状进行梳理。色彩表达模型介绍了色彩空间、色彩网络等对配色设计问题进行形式化表达的模型研究; 色彩意象介绍了个性化偏好、感知意象、情感意象和文化意象等四种意象指标的研究; 配色设计方法介绍了各类智能算法的应用成果。**结论** 归纳了配色设计领域的研究结果应用性、配色方案的编码设计、意象目标的中介性、洗牌和色区操作等问题和研究需求, 提出并讨论了超图、语义空间映射和非等位基因交叉等理论与方法在解决配色设计本质问题上的可能性。

**关键词:** 配色设计; 色彩模型; 色彩意象

**中图分类号:** TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)14-0092-09

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.14.010

### Review on the Study of Color Design

LIU Xiao-jian, JIA Ying-ying, XU Bo-qun  
(Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**ABSTRACT:** This paper aims to introduce the content, methods and technologies of color design in recent years, and put forward some problems to be solved and feasible related theories. A brief introduction is given to the research status of color design from three aspects including color expression model, color image and color design method. The color expression model part introduces the color space, color network and other models for the expression of color design problems. The color image part introduces the research of four kinds of color image, i.e. individual preference, perception image, emotion image and culture image. The application part introduces the utilities of intelligent algorithms in color design study. The application of results utility, coding design, mediation of image target, shuffling and manipulation of color region are summarized. The possibilities of hypergraph, semantic space mapping and non-allelic crossover in solving the essential problems of color design are discussed.

**KEY WORDS:** color design; color model; color image

配色是产品设计和艺术设计中的常态任务。与功能、形态、人机等设计要素相比, 配色设计受人的感性因素影响较大, 而配色方案的生成在技术上则并不存在太多困难, 因此评价与决策占据了配色设计研究的主要部分。由于评价标准带有较强的主观性, 并且受个人偏好、设计对象、意象目标、文化背景等多种复杂因素的影响, 所以配色设计过程不可避免地高度

依赖设计师和评价者。人的参与给设计结果带来了不确定性, 因此有关如何捕获配色方案评价的内在规律, 并在设计中反向应用的课题贯穿了各类研究。

基于这样的背景, 本文从色彩表达模型、色彩意象和配色设计方法 3 个方面对配色设计的研究现状进行简要介绍, 并对其中的问题、需求和相关理论与技术展开一些延伸思考。

收稿日期: 2021-02-10

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划基金项目 (19YJA850012)

作者简介: 刘肖健 (1972—), 男, 山东人, 博士, 浙江工业大学教授, 主要研究方向为计算机辅助设计。

通信作者: 徐博群 (1986—), 女, 浙江人, 博士, 浙江工业大学讲师, 主要研究方向为工业设计。

## 1 色彩表达模型

色彩表达模型是色彩设计的形式化基础,主要研究色彩的表达形式,如 RGB、CMYK、HSB 等,以及其在转换方法和应用上的差异与选择等。建立色彩表达模型是把配色问题映射为数学问题的关键步骤,也是借助数学和算法手段解决配色问题的必要途径。

面向不同应用目标的色彩表达模型目前已有几十种之多。Kahu<sup>[1]</sup>对 33 种色彩空间的可用性进行了分类并评估了其优劣势和限制。一些面向特定用途的色彩空间模型也不断被开发出来,如 Kim D H<sup>[2]</sup>开发了一种 ULAB 新型色彩空间,在其色彩坐标中植入了亮度修正和色差; Yanagida T<sup>[3]</sup>建立了面向色盲群体的色彩坐标系统。Wei S T<sup>[4]</sup>对比分析了两种在不同条件下,用于预测色彩的空间模型; Hu Guo-sheng<sup>[5]</sup>构建了基于三维空间的配色模型; Li Chang-jun<sup>[6]</sup>分析了一种新的色彩空间模型在视觉预测方面的性能,并与已有模型进行了比较。黄敏<sup>[7]</sup>基于用户实验测试了不同色彩空间的色差识别能力,给出了色彩空间模型的选择建议,使所关注的特征(或特征差异)展示得更清晰。Pastilha R C<sup>[8]</sup>基于 Munsell 色系和 NSC 色系展开了自然环境色彩在各种光源下的比较研究。Hajipour A<sup>[9]</sup>基于神经网络进行了纺织品印刷的色彩匹配,在数字设备显示色彩(LAB)和打印色彩(CMYK)两种空间模型之间进行了映射转换。Lara-Alvarez C<sup>[10]</sup>基于色彩空间的几何结构设计了和谐色调色盘,把配色方案变成了色彩空间中的可视化结构,研究了和谐的配色规律在色彩空间中的分布几何特征。

一般的配色方案在色彩空间中仅体现为散点,信息携带量不够丰富。针对这种不足,刘肖健<sup>[11]</sup>提出了一种色彩网络模型,用于描述配色方案的邻接、共现、集聚性等多种信息。李愚<sup>[12]</sup>在其基础上开发了基于色彩网络的色彩重用配色技术,实现了从图像色彩提取到重用的配色设计辅助,并以汽车外观配色为载体做了应用测试。Xu Bo-qun<sup>[13]</sup>进一步构建了包含源图像色彩和配色设计对象色彩的双网络模型,把色彩意象的重用问题转化为两个矩阵之间的映射问题,并给出了四个评价映射效果的指标,丰富了配色方案编码的信息内容。

除了 RGB 等描述色彩光学属性的模型外,色彩的语义空间模型对配色设计有更大的意义。其主要做法是以色彩性意象或与配色方案结构特征相关联的一些评价指标为坐标轴构建空间模型,用于评估色彩的感性定位或在空间寻优,如 Hu G<sup>[14]</sup>构建了基于 HSL 色彩空间的六变量色彩组合模型, Ding M<sup>[15]</sup>建立了用户色彩意象空间,并利用 BP 神经网络构建了色彩语义映射模型,进而实现通过遗传算法推荐配色方案等。

## 2 色彩意象

意象是色彩研究的一个大类,处理的是配色设计目标的问题。色彩意象主要研究人对色彩的心理映像,包括感觉、知觉、情感、偏好、文化倾向、消费意愿等。由于心理因素的模糊性和影响条件的复杂性,所以色彩意象的研究通常具有较为明确的指向性和应用范围界定,如针对特定产品、特定人群或特定文化现象等。

本文以从个体到群体的顺序为依据,将色彩意象的研究文献大致分为个性化偏好、感知意象、情感意象和文化意象四类。

### 2.1 个性化偏好

色彩的个性化偏好一般是指个体或某用户群的色彩偏好,以及这种偏好如何影响他们的消费行为。Choi P<sup>[16]</sup>使用贝叶斯分层模型研究了用户对背包产品的色彩偏好并建立了偏好模型。苏畅<sup>[17]</sup>采用分级加权模型对汽车车身的色彩样本进行了感性评价,用于辅助用户进行汽车选色决策。李孟山<sup>[18]</sup>提出了混合智能色彩决策方法,挖掘了用户群体的色彩偏好并指导消费决策。Won S<sup>[19]</sup>面向品牌传播需求,研究了产品色彩对吸引消费者注意力和传达品牌信息的影响。Yu Lu-wen<sup>[20]</sup>研究了消费者的色彩偏好在其购买产品的决策过程中所承担的角色及其重要性程度。Lin H<sup>[21]</sup>用模糊聚类算法基于灰色关联度计算来预测用户对系列产品的色彩偏好。Li Song-tao<sup>[22]</sup>从商品图像中提取特征色彩,结合商品零售数据,建立了色彩特征与流行度的关系模型,以其预测消费者的色彩偏好。Zhang Xin-xin<sup>[23]</sup>利用灰色理论和感性工学挖掘了产品色彩设计决策过程中的宏观和微观因素,建立了产品色彩与品牌形象的相关性模型。Yu Lu-wen<sup>[24]</sup>对测试个人色彩偏好的研究方法进行了比较,包括在线和实验室环境,以及选择和排序方法等,研究了不同性别和文化背景人群的色彩偏好差异,并给出了研究方法的建议。

### 2.2 感知意象

色彩的感知意象关注人对色彩的心理感知,侧重于人类共性的生物学特征的获取,对产品等载体的色彩设计形成基础性的支持。Huang Min<sup>[25]</sup>对比研究了五种传统色彩之间的和谐组合原则。Hsiao S<sup>[26]</sup>研究了色彩和谐的美学尺度计算方法,并基于模糊理论建立了配色参考图像与产品色彩之间的映射关系。陈丽丽<sup>[27]</sup>研究了色彩感觉的等级量化方法,以及色彩与感觉之间的相关关系。Bittermann M S<sup>[28]</sup>构建了人类对色彩美学特性的视觉感知模型,包括概率特征、先验性、有效性和视觉内存分配效率等。Oh S<sup>[29]</sup>研究了色调与色彩冷暖感之间的视觉感知匹配关系,以及不同冷暖感的灯光在色彩空间中的定位特征。Ding M<sup>[30]</sup>

基于心理学实验手段,通过因子分析和语义差异法研究了产品形状特征对用户色彩感知的影响机制,构建了考虑产品形状特征的产品色彩意象评价模型。Hu Guo-sheng<sup>[31]</sup>基于语义和色彩之间的联觉,创建了跨媒体映射模型,实现了语义与色彩的匹配设计,并提出了一种通过语义图像生成相应色彩组合的方法。Cha S H<sup>[32]</sup>在沉浸式虚拟环境中,通过实验方法分析了用户行为和研究室室内配色对人的情绪、行为和生理指标的影响。Kakehashi E<sup>[33]</sup>基于凤蝶图案研究了人类共性审美心理中的色彩组合特征,提出了通过自然界审美对象的色彩组合分析来揭示人类的色彩审美机制的方法。Gunes E<sup>[34]</sup>以面部表情为情绪载体,通过实验方法建立了室内空间色彩与代表六种基本情绪的面部表情之间的关联矩阵。

### 2.3 情感意象

色彩的情感意象关注较为高级的人类情感与色彩之间的复杂映射关系,其中色彩的情感通常是用一组形容词来表达。此类研究是文献集中度较高的领域。丁满<sup>[35]</sup>基于灰色关联分析法建立了色彩与情感意象之间的关联模型,以及配色方案的意象特征自动评价方法。Liu S<sup>[36]</sup>提出了面向情感主题的色彩提取方法。Hanada<sup>[37]</sup>分析了色相环与情绪、情感之间的映射关系,提出并检验了若干假设。Takahashi F<sup>[38]</sup>研究了从情感到色彩的反向映射,即词汇和表情符号所代表的情感意象激发色觉的方式。Jonaskaite D<sup>[39]</sup>研究了色彩与喜悦、放松、恐惧、悲伤等情感意象的关联模式。Zhang Xin-xin<sup>[40]</sup>通过构建色彩意象本体模型表达图像色彩的概念知识,探究用户的色彩意象认知过程,并将其用以提高意象信息挖掘的准确性。Demir U<sup>[41]</sup>基于软件界面背景色设计任务,对929名大学生被试进行了色彩与情感的之间的语义关联调研,指出性别、学历、专业背景等因素会造成色彩感知的差异。Chen Y<sup>[42]</sup>基于对20位来自韩国、中国、南非、墨西哥和英国的设计师的设计过程的调研,发现了色彩与概念的关联性对配色选择过程的影响。也有对色彩情感进行反向研究的案例,如Hou Y<sup>[43]</sup>尝试通过卷烟包装的配色设计降低青少年的吸烟率,通过负面心理联想设计出让青少年厌恶的配色方案,并用眼动实验进行了验证。

### 2.4 文化意象

色彩的文化意象关注特定文化背景的群体所拥有的共性色彩意象特征。文化意象的研究方法多数是对典型文化创造物(如历史图像、文化产品等)的色彩数据进行分析,而不是用实验方法直接研究人。Kirchner E<sup>[44]</sup>分析了中世纪伊斯兰文化中的色彩应用规律。Serra J<sup>[45]</sup>基于自然色彩系统分析了1931年的一组色彩设计样本的色彩组合特征,并构建了其3D空间的色彩组合网络。赵露晞<sup>[46]</sup>提出了一种色彩特征

显著度的评价标准,对多类中国传统织绣产品的色彩特征进行了分析与比较。Song I<sup>[47]</sup>对韩国的文化遗产进行了色彩分析,并提出了建筑色彩复原的方法建议。Kmita A<sup>[48]</sup>对文化遗产的图像文件进行了分析,提取了其图案与色彩的组合特征。Cho<sup>[49]</sup>比较研究了不同文化的色彩应用的饱和度、灰度等特征。Wang Ming-feng<sup>[50]</sup>通过聚类技术手段研究了国家文化与色彩应用之间的关联关系。Xu Bing<sup>[51]</sup>基于SAM量表测试了消费者对传统装饰图案的色彩组合的心理感知,建立了心理感知与传统配色方案之间的关系模型,并在考虑现代消费者心理感知的条件下,在设计中再现了传统色彩意象。

上述四类色彩意象的研究手段多数以聚类等技术挖掘、知识发现的相关技术为主。这类研究通常默认所研究的对象在色彩上皆具有集中统一的特征,但也有部分研究针对这一前提展开研究,如赵露晞<sup>[46]</sup>通过与随机图库比较的方法,对文化图像里的色彩特征的显著度设计了评价指标和算法,并计算了十余种中国传统文化图像提取色的特征显著度。色彩情感和色彩感知研究色彩对人的心理和生理刺激,在人的情感(如一组情绪形容词)或感知(冷暖、和谐等)与色彩或色彩组合之间建立映射模型,该模型或作为配色设计的依据,或作为智能配色算法中的自动评价依据。虽然这类研究众多,但是对同一组配色方案用于不同配色对象的差异性的研究还比较少,对研究结果的通用性推广原则缺少关注,因此仍需设计师在实践中进行把握。

## 3 配色设计方法

配色设计方法的研究主要面向评价、决策与生成配色方案的操作性技术,其中各类智能算法在这个该领域被广泛应用。配色设计一般涉及两种以上色彩的组合,色彩组合生成并赋予载体后,再基于个性化偏好、感知意象、情感意象或文化意象目标对色彩组合进行评价、优化和决策。因此,配色设计方法的工作诉求主要是寻找面向这些目标的配色方案求解手段,并满足精度和效率上的需求。

任琦<sup>[52]</sup>根据用户给定的彩色图像提取其特征色彩,并自动生成了与之相协调的一组色彩,并对载体进行了智能配色。干静<sup>[53]</sup>提出了一种色彩调和算法,可根据选定色自动产生所需要个数的调和色。刘炯宙<sup>[54]</sup>开发了色彩语义驱动的交互式遗传算法配色方法,降低了对设计师的专业要求。郭一楠<sup>[55]</sup>通过协同交互式多Agent文化算法,解决了配色设计交互式遗传算法的用户疲劳问题。Lin J<sup>[56]</sup>基于生物地理学的优化进化算法,解决了配色设计中复杂的多维优化问题。Hu G<sup>[57]</sup>开发了基于交互式操作生成和谐配色方案的技术。苏畅<sup>[58]</sup>基于感性工学和主成分分析法进行了汽车车身的色彩设计。Hsiao S W<sup>[59]</sup>基于模糊聚类

和灰色理论智能预测出了时装流行色。方力洋<sup>[60]</sup>提出了改进的色彩分布匹配映射设计方法,以及基于设计对象分区拓扑网络的室内色彩设计匹配方法。Wei Jia-qiang<sup>[61]</sup>基于改进的BP神经网络开发了新型计算机配色系统,实现了高精度色彩再现。Wu M<sup>[62]</sup>提出了一种概率方法,从配色方案中识别定性色彩选择知识并辅助配色。Kim E<sup>[63]</sup>通过增加图像和色彩元素之间的色调相似性实现了图像和色彩的和谐组合。赵黎<sup>[64]</sup>用BP神经网络构建了配色方案与用户多目标评价的映射模型,利用多目标、多蜂群优化算法获得了配色组合。Ouyang W<sup>[65]</sup>提出了无监督聚类的图像色彩分类和色彩区域划分的节点增长自组织网络,提高了信噪比和效率。朱昱宁<sup>[66]</sup>基于交互式遗传算法开发了辅助设计师的配色技术,以图像为配色参考源,将提取色彩映射至配色对象,实现了方案种群的自动生成和概率选择、交叉重组、变异、色区调整等系列遗传操作。该技术把配色过程分为了两个阶段,同时考虑了组合优化与连续变量优化,并给出了随机生成的配色方案“撞色”问题的解决方案。Guo F<sup>[67]</sup>针对色彩和谐和用户情感偏好两个优化目标,利用神经网络和遗传算法实现了三色产品配色设计的多目标优化。Ding M<sup>[68]</sup>基于感性工学理论和卷积神经网络,建立了产品色彩和用户情感意象之间的复杂关联模型,使用神经网络搜索并生成了符合用户意象的产品色彩设计方案。

配色设计类的研究文献很多,各类主流智能算法均有使用,如神经网络、进化算法、交互式遗传算法、模糊优化、蜂群优化等。这些智能算法里的评价模型有两类:一是色彩意象模型,在色彩值、色彩组合和色彩意象或偏好之间建立映射法则<sup>[26]</sup>(Hsiao S, 2017年);二是让用户对自动生成的方案进行交互式评价<sup>[55]</sup>。也有不少研究将两者融合在一起,同时提高色彩意象再现的准确度和效率<sup>[13]</sup>。

## 4 配色设计中的问题、需求和解决思路

### 4.1 配色设计中的问题和需求

对比文献研究成果和实际配色设计中的应用情况,配色设计的研究目前尚存在如下几个主要问题和需求。

#### 4.1.1 研究结果的应用性

文献中有大量的配色研究成果输出,包括色彩情感意象、配色原则、配色组合推荐等。然而研究结果对减轻设计师负担、提高工作效率帮助仍然有限,因为配色效果对具体配色对象的依赖性很强,所以同样的色彩组合用于不同的对象差别很大,通用性的方法和原则在具体应用时会有很大变数。而把配色对象或者色彩参考源作为配色技术的输入内容,又面临着对其进行自动编码的困难,配色对象的结构特征也只有

色值、占比等少数能进入优化算法过程,技术使用者在前期的编码处理和优化过程中的交互评价工作量仍然很大,这类依靠人力判断的工作会带来很大的不确定性。

#### 4.1.2 配色方案的编码设计

多数文献给出的配色方案的编码是一种极度简化的结构形式,很多只包含色值和占比信息。相比之下,用形容词来描述的各类色彩意象目标则多达上百。简陋的配色方案难以承载含义丰富的配色意象目标,强行匹配映射只能给出大致的推荐方向而难以形成精确的解方案。实际上,色彩参考图像或产品配色对象的色彩意象与诸多结构性因素有关,如提取色的集中度、在不同色彩空间中的分布特征、在画面空间分布特征、色区毗邻关系等,这些影响因素进入配色方案编码的具体模式还需要进一步深挖。

#### 4.1.3 意象目标的中介性

感知意象、情感意象、文化意象是配色研究中的常见关键词,这些意象通常以形容词表达配色目标。然而对于配色设计而言,这些意象目标都具有“中介”性质。比如调研表明用户喜欢冷灰色系,则配色研究的真正需求是研发配色技术,在产品上把最佳的冷灰色系做出来,而不是一定要去弄明白冷灰色系究竟代表什么“意象”,然后再针对该意象进行配色设计——这种二级映射的方法反倒引入了很多误差和不确定性。基于这种考虑,目前有不少研究避开了“意象表达”这一比较困难的工作,令其在配色设计过程中保持隐含状态,转向直接面向评价者偏好的配色方案的数据特征的分析<sup>[51]</sup>。这是近期配色研究的一个趋势。

#### 4.1.4 “洗牌”问题

“洗牌”指色区之间换色。洗牌涉及组合优化,但配色又并非纯粹的组合问题,这是由于配色同时还带有连续变量形式的色值的优化。两种不同类型的优化问题交织在一起,给配色技术的开发带来了复杂性。部分文献发现了这个问题,处理方案多数是把配色设计分解为不同的阶段,如将组合优化放在第一步,而将连续变量的优化放在第二步,以顺序的方式求解<sup>[12,66]</sup>,并在不同阶段使用不同技术。

#### 4.1.5 色区的操作

文献中的配色设计对象绝大多数已经规划好了色区并固定下来,即每个色区填一种色彩,而色区本身的大小和形状不再变化。然而在很多情况下,配色设计并不是一项独立的任务,而是需要结合配色对象的色区划分一起进行,即色区的划分会产生变化。这使得配色问题变得复杂起来。这种复杂性是技术上的,这是因为对色区进行自动化或智能化划分需要更多的算法支持。针对配色与其他要素的复合设计问题

的解决方案的研究还比较少。事实上,配色设计文献众多的一个原因就在于配色设计比图形设计、造型设计、人机设计等技术难度低,因为它的复杂性主要体现在决策层面,而生成设计方案的操作层面只有一个“填色”动作,几乎不会产生无效方案。这个特性也导致了配色设计经常被用作检验某种算法的载体。

## 4.2 与配色设计相关的理论与技术

基于文献中显示的问题和需求,以及笔者对配色设计的研究,总结了以下配色设计相关的理论和技術。

### 4.2.1 超图

超图(Hypergraph)概念最初是由法国数学家 Berge 于 1973 年提出的,他在 20 世纪 80 年代对其进行了发展,用于研究有限集合中各元素之间的多元关系问题<sup>[69]</sup>。

超图是二部网络的一般形式。普通网络的一条边只能连接两个节点(由两个节点定义一条边),而超图的边(超边)可以连接两个以上的节点,如“配色方案—色彩”的二部网络可以表达为以色彩为节点、以配色方案为超边的超图:一条超边(配色方案)连接了若干节点(色彩)。超图相比于二部网络的优势在于只有一种节点,为问题的解决方案求解提供了简洁的数学形式。当配色方案超过两色时,超图是一个可行的数学工具。

基于超图的应用研究大多重在复杂关系的表达和直接求解,利用超图模型进行产品设计的研究多数涉及产品的内部结构,虽然用超图方法研究配色的文献很少,但是其建模方法对配色设计有较大参考价值。部分相关研究如 Bretto A<sup>[70]</sup>在其著作中提到了超图的应用之一包括邻区相异填色,此外还有约束的化学物并置存储方案设计、制造商任务优化(如  $q$  个工厂  $p$  天执行  $n$  个任务求最小  $q$  值),以及关系数据库、优化问题等;胡枫<sup>[71]</sup>研究了从二分图到超图的延伸,构建了一个科研论文合作超图演化模型,利用平均场理论和仿真技术分析其演化规律;Wen L<sup>[72]</sup>在多目标跟踪算法中,以坐标为节点,以多坐标为超边建立了超图模型,从坐标的关联超图的层级密度结构中提取了相似度信息,形成了跟踪轨迹。超图在设计中的应用也有若干研究,其中可为配色设计借鉴的有 Michelen N<sup>[73]</sup>以设计关系为节点,以变量为超边,把设计问题映射为了带权自由超图;Grabska E<sup>[74-75]</sup>建立了一个支持设计与推理的超图系统,并将其用于处理家居空间布置设计;朱增国<sup>[76]</sup>构建了基于结构化超图的产品族模型,以模块化标准划分子超图,把配置模型的求解问题映射为约束满足问题;Li S<sup>[77]</sup>把设计问题映射为了超图模型,把复杂机械系统的优化设计问题处理为了半自由超图的分解问题;Strug B<sup>[78]</sup>为进化算法引入了超图,利用层级超图结构重新表达

了基因型并设计了遗传算子,并将其用以处理设计问题;肖玉芝<sup>[79]</sup>利用超图定位了用户并刻画了其兴趣爱好的差异性,预测了用户间的隐性关系。

### 4.2.2 语义空间映射

配色设计过程中经常需要处理多种意象,这些意象构成了语义空间。基于语义空间和基于编码空间的映射在优化原理和算法上均有很大差别。已有的语义空间配色研究在优化技术的处理上大部分对问题进行了很大的简化,多数假设语义空间与编码空间存在简单的对应关系。

在各类进化算法中,遗传编程(Genetic Programming,简称 GP)的语义空间最有代表性。遗传编程是进化计算的一个分支,1992年由 Koza J 提出<sup>[80]</sup>。GP 与一般遗传算法的主要区别在于其优化对象是一个功能系统(如程序、电路、函数公式、机械机构、系统模型等),而不是形态、色彩等静止的对象,因此 GP 的个体的适应度值无法根据编码直接计算得出,而要运行系统并根据输出结果产生适应度值。该特征催生了 GP 的语义研究<sup>[81]</sup>,成为 GP 区别于其他进化算法分支的一个特殊之处。语义 GP 是让对象系统执行一系列选定的案例,将其输出向量定义为该对象的“语义”,在此基础上实施各种遗传操作<sup>[82]</sup>。

除了语义空间的遗传操作以外,GP 的编码方式不是传统的线性串,而是树甚至图,这种编码为基于超图模型的遗传操作提供了可用技术。基于图的编码有很强的表达能力,成为拓展 GP 研究的一个重要分支<sup>[83]</sup>,如 Moraglio A<sup>[84]</sup>提出了针对表现型而非基因型的语义空间遗传操作方案,并设计了语义搜索算子,对配色而言,这相当于在意象空间执行各类遗传算子。Jackson D 深入研究了基于图的 GP<sup>[85]</sup>;O'Neill M<sup>[86]</sup>构建了 GP 语义模型;Castelli M<sup>[87]</sup>改进了 GP 的语义交叉算子;Pawlak T P<sup>[88]</sup>定义了语义空间结构,并给出了搜索算子行为和适应度计算方法。这些研究对解决配色问题(特别是针对意象目标的配色问题)有很好的借鉴价值。

### 4.2.3 非等位基因交叉

从遗传算法的角度,配色方案中的“洗牌”操作实际上是一种非等位基因交叉操作(不同色区的色值可以交叉互换)。这种操作是配色问题所特有的,如能解决,是对配色设计常用的遗传算法的一个显著完善和拓展,也是对配色问题的混合优化操作的一种解决方案。

## 5 结语

配色设计是一个即热又冷的领域。“热”是因为配色实现技术简单、工具多样,一般的二维或三维 CAD 平台均支持二次开发,因此成为进化算法、神

经网络、深度学习等算法技术的应用对象和检验载体。“冷”是指对配色设计本身的一些深层问题的关注不够,如对色彩组合的选择原则、等位基因交叉、色区邻接特性、色彩意象再现等关键问题数学本质的建模欠缺。

虽然色彩研究成果很多,但是各类配色组合、配色原则的充分再利用程度还比较低。另外,以图像为主的配色参考源的色彩提取信息还比较简陋,未能有效利用配色对象的结构特征,难以全面承载丰富的色彩意象指标,致使配色效果评价的客观计算依据不足,因而过分依赖人工评价,影响了效率和精准性。

配色设计的研究虽然以应用领域居多,但是其数学本质具有一定特色,相关理论领域也有可资利用的思路,期待进一步的关注。

#### 参考文献:

- [1] SAMRUDDHI Y, KAHU, RAJESH B, et al. Review and Evaluation of Color Spaces for Image/Video Compression[J]. *Color Research & Application*, 2019, 44: 8-33.
- [2] KIM D H. The ULAB Colour Space[J]. *Color Research & Application*, 2015, 40: 17-29.
- [3] YANAGIDA T, OKAJIMA K, MIMURA H. Color Scheme Adjustment by Fuzzy Constraint Satisfaction for Color Vision Deficiencies[J]. *Color Research & Application*, 2015, 40: 446-464.
- [4] WEI S T, LUO M R, XIAO K, et al. A Comprehensive Model of Color Appearance for Related and Unrelated Colors of Varying Size Viewed under Mesopic to Photopic Conditions[J]. *Color Research & Application*, 2017, 42(3): 1-15.
- [5] HU Guo-sheng, SHENG Ai, ZHANG Yi-zhong, et al. An Analytic Measure of Perceptual Factors for Color Composition[J]. *Color Research & Application*, 2017, 41: 165-174.
- [6] LI Chang-jun, LI Zhi-qiang, WANG Zhi-feng, et al. Comprehensive Color Solutions: CAM16, CAT16, and CAM16-UCS[J]. *Color Research & Application*. 2017, 42: 703-718.
- [7] 黄敏, 何瑞丽, 史春洁, 等. 比较法测试不同颜色匹配函数的性能[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(7): 2241-2249.  
HUANG Min, HE Rui-li, SHI Chun-jie, et al. Comparison Method to Test the Performance of Different Color Matching Functions[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(7): 2241-2249.
- [8] PASTILHA R C, LINHARES J M M, RODRIGUES A I C, Nascimento SMC. Describing Natural Colors With Munsell and NCS Color Systems[J]. *Color Research and Application*, 2019, 44(3): 411-418.
- [9] HAJIPOUR A, SHAMS-NATERI A. Improve Neural Network-Based Color Matching of Inkjet Textileprinting by Classification with Competitive Neural Network[J]. *Color Research & Application*, 2019, 44: 65-72.
- [10] LARA-ALVAREZ C, REYES T. A Geometric Approach to Harmonic Color Palette Design[J]. *Color Research & Application*, 2019, 44: 106-114.
- [11] 刘肖健, 曹愉静, 赵露晞. 传统纹样的色彩网络模型及配色设计辅助技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(4): 899-907.  
LIU Xiao-jian, CAO Yu-jing, ZHAO Lu-xi. The Color Network Model of Traditional Patterns and the Auxiliary Technology of Color Matching Design[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2016, 22(4): 899-907.
- [12] 李愚, 刘肖健, 孙艳, 等. 产品配色设计的色彩邻接网络模型[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(9): 2355-2364.  
LI Yu, LIU Xiao-jian, SUN Yan, et al. The Color Adjacency Network Model of Product Color Design[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2019, 25(9): 2355-2364.
- [13] XU Bo-qun, LIU Xiao-jian, LU Chun-fu, et al. Transferring the Color Imagery from an Image: a Color Network Model for Assisting Color Combination[J]. *Color Research & Application*, 2019, 44(2): 205-220.
- [14] HU G, ZHANG M, PAN Z. A User-Oriented Method for Preferential Color Scheme Generation[J]. *Color Research & Application*, 2015, 40: 147-156.
- [15] [15] MAN Ding, WEI Dong. Product Color Emotional Design Considering Color Layout[J]. *Color Research & Application*, 2019, 44: 285-295.
- [16] CHOI P, ORSBORN S, BOATWRIGHT P. Bayesian Analysis of Color Preferences: an Application for Product and Product Line Design[J]. *Color Research & Application*, 2016, 41: 445-456.
- [17] 苏畅, 付黎明, 魏君, 等. 基于分级加权模型的车身色彩感性评价方法[J]. *汽车工程*, 2017, 39(1): 35-40.  
SU Chang, FU Li-ming, WEI Jun, et al. Evaluation Method of Car Body Color Perception Based on Hierarchical Weighted Model[J]. *Automotive Engineering*, 2017, 39(1): 35-40.
- [18] 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. A Color Decision System That Integrates Hybrid Intelligent Methods and Multi-User Imagery[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphic*, 2017, 29(11): 2091-2099.
- [19] WON S, WESTLAND W. Colour Meaning and Consumer Expectations[J]. *Color Research & Application*, 2018, 43: 100-109.
- [20] YU Lu-wen, WESTLAND S, LI Zhen-hong, et al. The Role of Individual Colour Preferences in Consumer

- Purchase Decisions[J]. *Color Research & Application*, 2018, 43: 258-267.
- [21] LIN H. A Systematic Approach of Predicting Color Preference on the Basis of Gray Relational Grade[J]. *Color Research & Application*, 2019, 44: 194-204.
- [22] LI Song-tao, CHEN Ruo-ran, YANG Li-jian, et al. Predictive Modeling of Consumer Color Preference: Using Retail Data and Merchandise Images[J]. *Journal of forecasting*, 2020, 39: 1305-1323.
- [23] ZHANG Xin-xin, YANG Ming-gang, SU Jian-ning, et al. Research on Product Color Design Decision Driven by Brand Image[J]. *Color Research and Application*, 2020, 45: 1202-1216.
- [24] YU Lu-wen, WESTLAND S, LI Zhen-hong. Analysis of Experiments to Determine Individual Colour Preference[J]. *Color Research and Application*, 2020, 46: 155-167.
- [25] HUANG Min, CUI Gui-hua, MELGOSA M, et al. Color Harmony in Two-Piece Garments[J]. *Color Research & Application*, 2017, 42: 498-511.
- [26] HSIAO S, YANG Men-hua, Lee C H. An Aesthetic Measurement Method for Matching Colours in Product Design[J]. *Color Research & Application*, 2017, 42: 664-683.
- [27] 陈丽丽, 王立川, 陈雁. 色彩感觉特性的评价[J]. *纺织学报*, 2017, 38(9): 127-130.  
CHEN Li-li, WANG Li-chuan, CHEN Yan. Evaluation of Color Perception Characteristics[J]. *Journal of Textile Research*, 2017, 38(9): 127-130.
- [28] BITTERMANN M S. Insight into Color Aesthetics from Probabilistic Perception Modeling[J]. *Color Research & Application*, 2018, 43: 527-543.
- [29] OH S, KWAK Y. Hue and Warm-Cool Feeling as the Visual Resemblance Criteria for ISO-CCT Judgment[J]. *Color Research & Application*, 2019, 44: 176-183.
- [30] DING Man, BAI Zhong-hang. Product Color Emotional Design Adaptive to Product Shape Feature Variation[J]. *Color Research & Application*, 2019, 44: 811-823.
- [31] HU Guo-sheng, LIU Zheng, WANG Yun, et al. Calculative Modeling for Quantified Semantics - Color Mapping[J]. *Color Research and Application*, 2020, 45: 465-476.
- [32] CHA S H, ZHANG S, 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: 51-65.
- [33] KAKEHASHI E, MURAMATSU K, HIBINO H. Computational Color Combination Analysis of Papilionidae Butterflies as Aesthetic Objects[J]. *Color Research and Application*, 2020, 45: 65-84.
- [34] GUNES E, OLGUNTURK N. Color - Emotion Associations in Interiors[J]. *Color Research and Application*, 2020, 45: 129-141.
- [35] 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 Image of Multi-Work Mode Products[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphic*, 2009, 21(12): 1857-1862.
- [36] LIU S, LUO H. Hierarchical Emotional Color Theme Extraction[J]. *Color Research & Application*, 2016, 41: 513-522.
- [37] HANADA, MITSUHIKO. Correspondence Analysis of Color-Emotion Associations[J]. *Color Research & Application*, 2018, 3: 224-237.
- [38] TAKAHASHI F, KAWABATA Y. The Association between Colors and Emotions for Emotional Words and Facial Expressions[J]. *Color Research & Application*, 2018, 43: 247-257.
- [39] JONAUSKAITE D, ALTHAUS B, DAEL N, et al. What Color Do You Feel? Color Choices are Driven by Mood[J]. *Color Research & Application*, 2019, 44: 272-284.
- [40] ZHANG Xin-xin, YANG Ming-gang. Color Image Knowledge Model Construction Based on Ontology[J]. *Color Research and Application*, 2019, 44: 651-662.
- [41] DEMIR U. Investigation of Color - Emotion Associations of the University Students[J]. *Color Research and Application*, 2020, 45: 871-884.
- [42] CHEN Y, YU L, WESTLAND S, et al. Investigation of Designers' Colour Selection Process[J]. *Color Research and Application*, 2021, 46: 557-565.
- [43] HOU Y, ZHANG S, LIU X, et al. Color Design of Cigarette Packaging for Reducing Smoking Rate in Youth[J]. *Color Research and Application*, 2020, 45: 699-709.
- [44] KIRCHNER E. Color Theory and Color Order in Medieval Islam: a Review[J]. *Color Research & Application*, 2015, 40: 5-16.
- [45] SERRA J, LLOPIS J, TORRES A. Color Combination Criteria in LeCorbusier's Purist Architecture Based on Salubra Claviers From 1931[J]. *Color Research & Application*, 2016, 41: 58-100.
- [46] 赵露晞. 中国传统文化色彩网络的大数据分析技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016.  
ZHAO Lu-xi. Big Data Analysis Technology of Chinese Traditional Cultural Color Network[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016.
- [47] SONG I, BANG B, OH S, et al. Dancheong Colors Used for Korean Cultural Heritage Architecture Restoration[J]. *Color Research & Application*, 2018, 43: 586-595.
- [48] KMITA A. Decorative Patterns and Sets of Colors Inspired by Folk and Applied Arts of Upper Silesia, a Popularization of Visual Cultural Heritage of the Region[J]. *Color Research & Application*, 2018, 43: 942-950.

- [49] CHO, YOON, JI, et al. A Cross-Cultural Comparison of Saturation, Vividness, Blackness and Whiteness Scales[J]. *Color Research & Application*, 2017, 42: 203-215.
- [50] WANG Ming-feng. A Study on Fuzzy C-Means Application in Austronesian language Cultural and Creative Product Colors[J]. *Color Research & Application*, 2018, 43: 375-386.
- [51] XU Bing. The Inheritance and Creative Design of Traditional Color Scheme Based on Modern Consumer's Psychological Perception: Taking Chinese Traditional Decorative Pattern's Color Collocation as an Example[J]. *Color Research and Application*, 2021, 46: 856-870.
- [52] 任琦, 徐迎庆, 庄越挺, 等. 面向办公应用的自动配色方案创作与应用系统[J]. *软件学报*, 2005(5): 691-699.  
REN Qi, XU Ying-qing, ZHUANG Yue-ting, et al. An Automatic Color Scheme Creation and Application System for Office Applications[J]. *Journal of Software*, 2005(5): 691-699.
- [53] 干静, 游宇, 殷国富, 等. 面向工程机械个性化定制的色彩调和算法研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2007(6): 163-167.  
GAN Jing, YOU Yu, YING Guo-fu, et al. Color Reconciliation Algorithm for Personalized Customization of Construction Machinery[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2007(6): 163-167.
- [54] 刘炯宙, 李基拓, 陆国栋. 色彩语义驱动的产品交互式遗传配色设计[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2012, 24(5): 669-676.  
LIU Jiong-zhou, LI Ji-tuo, LU Guo-dong. Color and Semantic-Driven Product Interactive Genetic Color Matching Design[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphic*, 2012, 24(5): 669-676.
- [55] 郭一楠, 叶莉, 程健. 基于协同交互式多 Agent 文化算法的多用户智能配色优化设计[C]. 长沙: 中南大学出版社, 2013.  
GUO Yi-nan, YE Li, CHENG Jian. Multi-user Intelligent Color Matching Optimization Design Based on Collaborative Interactive Multi-Agent Cultural Algorithm[C]. Changsha: Central South University Press, 2013.
- [56] LIN J, XU L, ZHAN H. Hybrid Biogeography Based on Optimization for Constrained Optimal Spot Color Matching[J]. *Col Res Appl*, 2014, 39: 607-615.
- [57] HU G, PAN Z, ZHANG M. An Interactive Method for Generating Harmonious Color Schemes[J]. *Color Research & Application*, 2014, 39: 70-78.
- [58] 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 Liming, WEI Jun, et al. Car Body Color Design Based on Perceptual Engineering and Principal Component Analysis[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology)*, 2016, 46(5): 1414-1419.
- [59] HSIAO S W, YANG M H. A Methodology for Predicting the Color Trend to Get a Three-Colored Combination[J]. *Color Research & Application*, 2017, 42: 102-114.
- [60] 方力洋, 王进, 陆国栋. 拓扑信息区域匹配的室内设计色彩转移算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2017, 29(6): 1044-1051.  
FANG Li-yang, WANG Jin, LU Guo-dong. Tuopu Information are a Matching Interior Design Color Transfer Algorithm[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphic*, 2017, 29(6): 1044-1051.
- [61] WEI Jia-qiang, PENG Meng-dong, LI Qing, et al. Evaluation of a Novel Computer Color Matching System Based on the Improved Back-Propagation Neural Network Model[J]. *Journal of Prosthodontics*, 2018, 27: 775-783.
- [62] WU M, CHEN T, LYU G, et al. Identification and Formalization of Knowledge for Coloring Qualitative Geospatial Data[J]. *Color Research & Application*, 2018, 43: 198-208.
- [63] KIM E, SUK H. Image Color Adjustment for Harmony with a Target Color[J]. *Color Research & Application*, 2018, 43: 75-88.
- [64] 赵黎, 杨连贺, 黄新. 基于多目标蜂群优化算法的计算机辅助配色[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(2): 381-389.  
ZHAO Li, YANG Lian-he, HUANG Xin. Computer-Aided Color Matching Based on Multi-Objective Bee Colony Optimization Algorithm[J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2018, 24(2): 381-389.
- [65] JOUYANG W, XU X, YUAN Y. Color Segmentation in Multicolor Images Using Node-Growing Self-Organizing Map[J]. *Color Research & Application*, 2019, 44: 184-193.
- [66] 朱昱宁, 徐博群, 刘肖健. 基于交互式遗传算法的参考图像辅助配色设计[J]. *包装工程*, 2020, 41(2): 181-188.  
ZHU Yu-ning, XU Bo-qun, LIU Xiao-jian. Reference Image-Assisted Color Matching Design Based on Interactive Genetic Algorithm[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(2): 181-188.
- [67] GUO F, LI F, NAGAMACHI M, et al. Research on Color Optimization of Tricolor Product Considering Color Harmony and Users' Emotion[J]. *Color Research and Application*, 2020, 45: 156-171.
- [68] DING M, CHENG Y, ZHANG J, et al. Product Color Emotional Design Based on a Convolutional Neural Network and Search Neural Network[J]. *Color Research and Application*, 2021, 10: 1002-22668.
- [69] BERGE C. *Hypergraphs*[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V, 1989.
- [70] BRETTO A. *Hypergraph Theory: an Introduction*[M].



- Berlin: Springer International Publishing Switzerland, 2013.
- [71] 胡枫, 赵海兴, 何佳倍, 等. 基于超图结构的科研合作网络演化模型[J]. 物理学报, 2013, 62(19): 547-554.  
HU Feng, ZHAO Hai-xing, HE Jia-bei, et al. The Evolution Model of Scientific Research Cooperation Network Based on the Hypergraph Structure[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(19): 547-554.
- [72] WEN L, LEI, Z, LYU S, et al. Exploiting Hierarchical Dense Structures on Hypergraphs for Multi-Object Tracking[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2016, 38(10): 1983-1996.
- [73] MICHELENA N, PAPALAMBROS P. A Hypergraphs Framework for Optimal Model-based Decomposition of Design Problems[J]. Computational Optimization and Applications, 1997, 8(2): 173-196.
- [74] GRABSKA E, BORKOWSKI A, PALACZ W, et al. Hypergraph System Supporting Design and Reasoning in: EG-ICE International Workshop[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [75] GRABSKA E, STRUG B, SLUSARCZYK G. Hypergraph-Based Evolutionary Design System[C]. Milan: Proceedings of the 10th Generative Art Conference, 2007.
- [76] 朱国增. 基于超图理论的产品配置设计系统研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2008.  
ZHU Guo-zeng. Product Configuration Design System Based on Hypergraph Theory[D]. Hangzhou: University of Technology, 2008.
- [77] LI S, WAN X. A Global Method for the Limited k-Partitioning of Hypergraphs Representing Optimal Design Problems in Complex Machine Systems[J]. Kybernetes, 2010, 39(6): 980-989.
- [78] STRUG B, GRABSKA E, SLUSARCZYK G. Supporting the Design Process With Hypergraph Genetic Operators[J]. Advanced Engineering Informatics, 2014(28): 11-27.
- [79] 肖玉芝, 赵海兴. 基于超图理论的在线社会网络用户行为分析[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(7): 50-54.  
XIAO Yu-zhi, ZHAO Hai-xing. Online Social Network User Behavior Analysis Based on Hypergraph Theory[J]. Computer Applications and Software, 2014, 31(7): 50-54.
- [80] KOZA J R. Genetic Programming (I) [M]. Cambridge: MIT Press, 1992.
- [81] PAWLAK T P, WIELOCH B, KRAWIEC K. Review and Comparative Analysis of Geometric Semantic Crossovers[J]. Genet Program Evolvable Mach, 2015, 16: 351-386.
- [82] VANNESCHI L, CASTELLI M, SILVA S. A Survey of Semantic Methods in Genetic Programming[J]. Genet Program Evolvable Mach, 2014, 15(2): 195-214.
- [83] SUCHORZEWSKI M, CLUNE J. A Novel Generative Encoding for Evolving Modular, Regular and Scalable Networks[C]. Dublin: the 13th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation (ACM), 2011.
- [84] MORAGLIO A, KRAWIEC K, JOHNSON C G, et al. Geometric Semantic Genetic Programming[C]. Berlin: the 12th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, 2012.
- [85] JACKSON D. A New Node-Focused Model for Genetic Programming[C]. Malaga: the 15th European Conference on Genetic Programming, 2012.
- [86] O'NEILL M. Semantic Methods in Genetic Programming[J]. Genet Program Evolvable Mach, 2016, 17: 3-4.
- [87] CASTELLI M, MANZONI L, VANNESCHI L, et al. Self-Tuning Geometric Semantic Genetic Programming[J]. Genet Program Evolvable Mach, 2016, 17: 55-74.
- [88] PAWLAK T P, KRAWIEC K. Progress Properties and Fitness Bounds for Geometric Semantic Search Operators[J]. Genet Program Evolvable Mach, 2016, 17: 5-23.