基于交互式遗传算法的参考图像辅助配色设计

朱昱宁，徐博群，刘肖健
（浙江工业大学，杭州 310023）

摘要：目的 降低配色过程中意象表达的不稳定性，在配色方案中，辅助设计师将隐性的设计理念表达出来。**方法** 设计师使用心仪图像作为配色意象的参考，并采用交互式遗传算法开发辅助设计师的配色技术，将提取的各种色彩组合映射至配色对象，供设计师评价与选择。在 CorelDraw 平台上搭建原型系统，设计人机交互界面。以敦煌壁画为配色意象来源，进行图像配色的实例分析。**结果** 实现了方案的自动批量生成及其概率选择、交叉重组、变异、色区调整等系列遗传操作，得到了与图像意象融合的最优配色方案。**结论** 在色彩提取值框架内，设计师通过交互式遗传算法辅助软件，从全局视角观察配色方案，在人机互动作用下，逐步优化方案，以便在短时间内搜索到符合设计师配色思维的方案。

关键词：配色设计；交互式遗传算法；色彩意象；参考图像
中图分类号：TB472 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2020)02-0181-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.02.027

Reference Image Aided Color Matching Design Based on Interactive Genetic Algorithm

ZHU Yu-ning, *XU Bo-qun*, *LIU Xiao-jian*
(Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

ABSTRACT: The work aims to reduce the instability of image expression during color matching and assist designers in expressing the hidden design concept in the color scheme. With the designer's favorite image as a reference for the color matching image, the interactive genetic algorithm was used to develop the technology to assist the designer. Various extracted color combinations were mapped to color matching objects for designer evaluation and selection. The prototype system was built on the CorelDraw platform and the human-computer interaction interface was designed. The Dunhuang murals were taken as color matching image source to carry out the case analysis on the color matching of images. The automatic mass production of the scheme and its genetic operations such as probability selection, cross recombination, mutation, and color zone adjustment were realized to obtain the optimal color scheme embodying the imagery of reference image. Within the framework of the color extraction value, the designer can observe the color scheme from a global perspective through interactive genetic algorithm assistant software, and gradually optimize the scheme under the interaction of human and computer, so as to find the scheme in line with the color matching thought of the designer in a short time.

KEY WORDS: color matching design; interactive genetic algorithms; color image; reference image

配色设计是视觉艺术创作和产品开发流程中的重要环节。设计师对色彩意象进行建模，在色彩意象与配色方案之间建立映射关系，通过数字化方法，并根据意象指标，可以搜寻出满意的配色方案[1]。通过这种方式，可以将配色问题转化成常规优化问题。设计师将神经网络[2]、遗传算法[3]、蚁群算法[4]等智能算法用于配色问题，获得了多项研究成果。由于色彩意象十分复杂，会受到载体类型、功能、形态、使用环境等多种因素的影响，这些与配色对象有关的约束条件又很难融入到配色意象模型中，所以完全相同的

收稿日期：2019-09-28
基金项目：教育部人文社会科学研究规划基金（19YJA850012）
作者简介：朱昱宁（1984—），男，浙江人，硕士，浙江工业大学讲师，主要研究方向为产品开发与设计。
通信作者：徐博群（1986—），女，浙江人，博士，浙江工业大学讲师，主要研究方向为色彩文化与设计管理。

配色方案使用在不同的场合中也会产生相当大的差异。这给智能化配色设计技术带来了巨大的挑战，因此，目前可以在智能技术中融入人的角色，让人来处理算法难以完成的工作，通过人机协作模式来完成配色任务[5]。交互式遗传算法(Interactive Genetic Algorithms,简称 IGA)是进化算法家族的一个分支[6]，其主要特征是通过人的交互评价来得到种群中个体适应度的值。IGA 常被用于艺术、设计、作曲、创造等难以结构化的任务中，这也符合配色设计对人机协作智能技术的需求，因此，IGA 常被用于配色设计中[7]。IGA 的主要问题是效率低下，因为人的疲劳效应会影响评价精度和算法质量，所以进化代数不能太多，不能像常规进化算法一样迭代成千上万次。迭代次数少带来的问题是对解决方案范围的搜索不完全，导致容易错过潜在的优秀方案。因此，有关 IGA 的研究很多都集中在寻找效率和早熟性收敛的平衡上，以及如何基于人的评价信息进行建模，希望能够用模型代替人来完成部分评价工作[8]。目前的 IGA 配色方法基本立于语义感知的基础上[9]，在从语言到色彩的转译过程中有诸多不可控的误差，本文试图以参考图像为配色设计灵感来研究 IGA 的用法，并考虑设计师的实际工作模式，在原始种群构建、色彩方案生成、交互评价方法等方面进行一些针对性的改进。

1 以图像为灵感的配色方法

因为设计师个体、文化和社会存在区别，甚至同一个主体在不同状态下都会形成不同的色彩搭配偏好[10]，所以很难将一种固定的理论作为多种设计情况的配色指导。从精心选择的图像中获得色彩灵感并用于配色设计，是设计师常用的配色方法。关于图像色彩搭配的重用问题，不少学者已经进行了相关的研究。如 Hsiao[11]建立了自然色彩配色设计系统（NCPD），它可以将照片中的蝴蝶色彩运用于运动鞋的色彩搭配中，通过比较源图与配色方案的模糊关系矩阵来表达两者的相似度；Wang[12]通过模糊 C-Means 聚类法提取了南太平洋群岛最具特色的文化色彩，并用于文化创意产品之中。

如何选择最优的方案是以图像为灵感的配色方法的重点，配色设计过程中往往需要设计师不断地评价、筛选与修改，从而实现渐进式的完善过程[13]。参考图像中通常存在上百甚至上千种不同的色彩组合方式，设计师无法一一进行比较和选择，对配色方案的评价也往往添加了自身的感性认识，目前对参考图像的信息捕捉多依赖于设计师的直觉与设计能力[14]。以图像为灵感的配色设计过程及其问题见图 1。

2 IGA 辅助流程与技术架构

2.1 IGA 对设计师的辅助流程

IGA 辅助配色技术不仅可以提高设计师配色的工作效率，而且可以将 IGA 辅助配色设计理念中隐性的、不易模型化的特征通过人机交互行为表现出来，并体现在配色方案上。

IGA 辅助设计师配色过程见图 2。

设计师的主要工作分为四个部分：一是考虑影响配色效果的各种外部因素；二是处理待配色目标，包括色区的划分、为自动程序准备好文档格式等；三是提供配色参考源，把所需的意象指标以图像的形式呈现出来；四是在优化过程中进行交互评价或调整配色方案，干预进化过程。

2.2 IGA 技术架构

在 IGA 常规技术的基础上，结合配色设计过程的具体需求，对技术的流程架构主要进行了如下分析。

1）开发平台的选择。本文暂时只考虑图像设计中的配色任务，因此开发平台常使用矢量绘图软件 CorelDraw 来选择设计师。

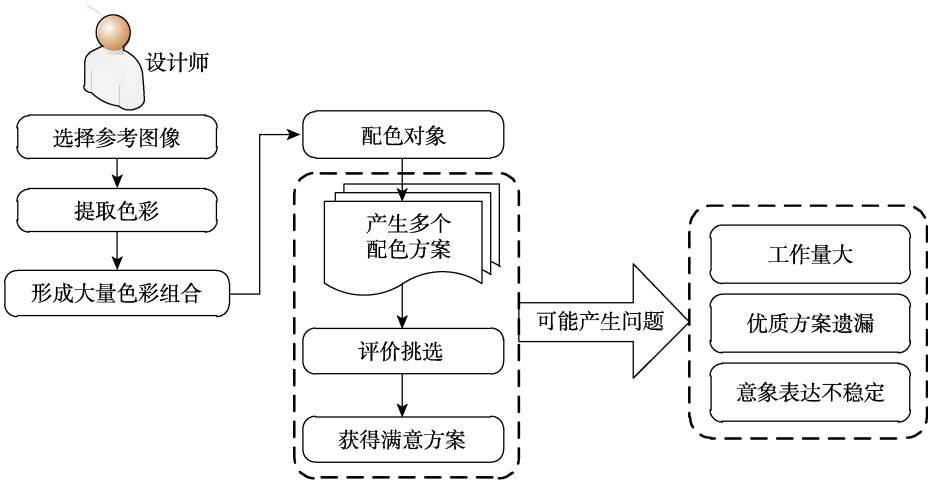

图 1 以图像为灵感的配色设计过程及其问题

Fig.1 Image-inspired color matching design process and its shortcomings

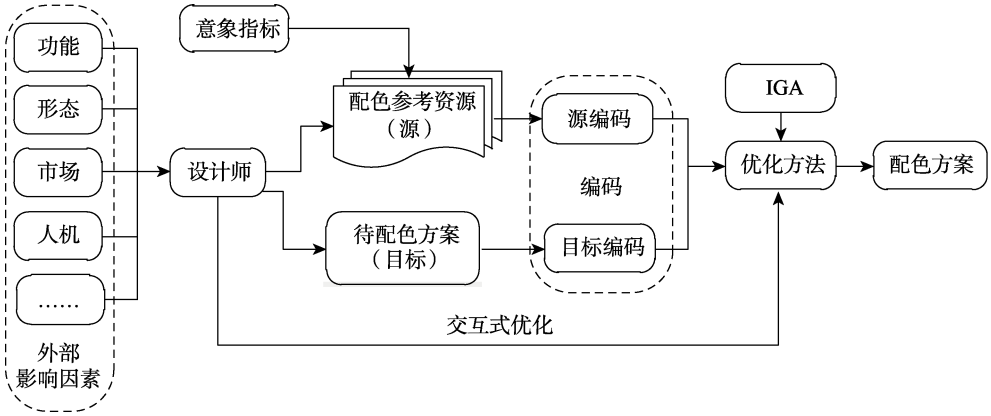

图 2　IGA 辅助设计师配色过程

Fig.2　IGA assisted designer color matching process

2）配色参考源的使用。很多情况下，配色设计的灵感来源于一些图片中的色彩组合，体现在遗传算法中，即初始种群的构建方式。本文以设计师提供的图片作为配色参考源，从中提取出若干特征色，算法程序根据配色方案的色区数，从中随机选出若干色彩进行填充，形成初始种群。

3）设计师的交互方式设计。IGA 的交互方式体现在设计师对自动生成的个体方案的评价，其中打分法是最常见的评价方式。一个 IGA 种群的规模通常是 8~40，如果依次对其打分会使设计师的工作负荷过大。本文结合 CorelDraw 自身的特性，设计了“默认分值+批量赋分”的方法，让设计师可以尽快对一个种群中的个体给出准确的分层。

与一般设计问题不同的是，在配色设计过程中可通过互换不同色区的色彩来寻找优化方案。从遗传学角度，该特征的本质是非等位基因重组，即同一个体的不同基因之间和进行值的互换。本文基于“洗牌”操作来实现非等位基因重组，让设计师通过交互操作调整个体方案的配色，最终得到满意结果。

通过上述几点分析，可以得到配色 IGA 的进化操作流程，见图 3。其中，色彩提取，配色方案的生成、展示，以及设计师的交互评价等与配色方案相关的内容，可通过调用 CorelDraw VBA 的函数库来实现。

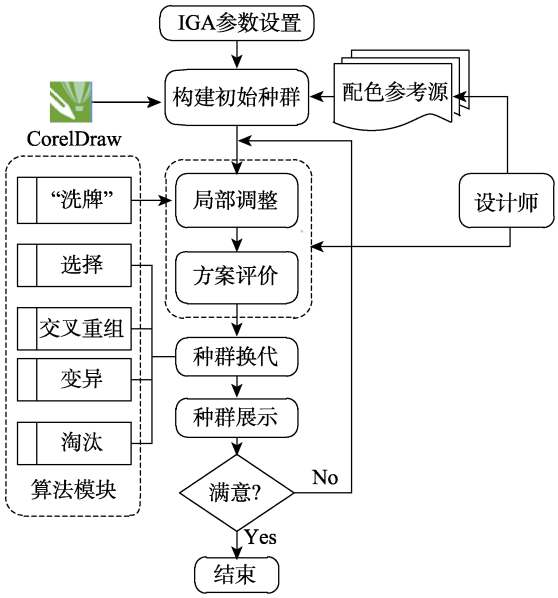

图 3　配色 IGA 的进化操作流程

Fig.3　Evolutionary operation flow of color matching IGA

3　系统开发与技术实现

3.1　系统界面

IGA 配色设计插件在 CorelDraw X3 版本上进行了二次开发，通过文档内嵌宏的形式运行，IGA 配色设计插件界面见图 4。此插件界面呈竖长型分布，方便在软件左右两侧的空白处显示，避免遮挡工作区。界面上的控件按 IGA 的运行流程从上到下分布。IGA 配色设计插件界面见图 4。

图 4　IGA 配色设计插件界面

Fig.4　Interface of IGA color matching design plug-in

3.2　获取配色对象编码

图 4 中的“获取编码”按钮用来为配色对象进行编

码，即在程序内部形成配色方案的基因表达式，具体如下：

$$\boldsymbol{C}=\{c_1,c_2,\cdots c_i\cdots,c_n\} \quad (1)$$

$$c_i=(r_i,g_i,b_i) \quad (2)$$

式中：c_i 为色彩的值。本文的配色操作基于 RGB 空间进行，因此 c_i 为 RGB 空间中的三维数组。

编码以全局数组的形式保存在程序中，点击“获取编码”按钮前，需要先选中一个由设计师预先定义好的配色对象。如果未选中对象，对话框将报错。基于 CorelDraw 的文档结构特征对配色对象的要求如下：（1）配色对象（见图 5）必须是一个群组对象，需要事先把配色方案中同色的子对象群组在一起，配色对象群组形式见图 6，图 6 为图 5 的群组信息；（2）群组中不能包含无色对象、位图对象和非单色填充对象（渐变填充、纹样填充等）；（3）群组里可填充色彩的子对象数至少应有两个，即至少应该有两种色彩；（4）如果子对象是群组，则群组内部的下一级子对象应为同色。

程序首先统计配色对象有几种色彩，然后显示在按钮右侧的“色彩数”显示框里。统计色彩数的方法为查询所选的对象群组内的子对象数量。色彩数显示框的内容为只读，IGA 算法流程中的许多操作会用到该数据，程序将从这个显示框里获取色彩数。

3.3 建立初始种群

采用 K-Means 方法提取图像的特征色，包括色值和每种色所包含的像素数量。在成功获取配色对象的编码后，建立初始种群的控件框内的执行按钮“Go!”变为可用状态，其功能是在当前 CorelDraw 的文档中创建一个新页面，并生成一系列随机搭配的组合作为初始种群。方案的数量为“行数×列数”，行列数通过手动输入，默认各为 4，即生成十六款新方案，并且每次生成的配色方案都是不重复的。生成提取色随机搭配的初始种群见图 7。

3.4 方案评价

图 4 中的“初始得分”输入框可由设计师设置，在生成初始种群的同时，赋予所有方案一个默认得分值（缺省值），其目的是为了减轻设计师评价的工作量，设计师只为优秀的和较差的方案打分，剩下的方案可赋予默认值。设计师从种群中选中想要评价的方案（可以多选），在“选中方案得分”输入框中输入得分值，然后按下按钮“Go!”，被选中的方案就会被赋予新的得分值。随后，整个种群的得分值就会被显示在一个弹出的对话框中，种群得分值显示框见图 8。未被评价的方案的得分值保持生成时赋予的默认得分值，被多次评价的方案取最后一次的得分值。

图 5 配色对象
Fig.5 Color matching object

图 6 配色对象群组形式
Fig.6 Group form of color matching object

图 7 生成提取色随机搭配的初始种群
Fig.7 Generation of initial population randomly matched by the extracted colors

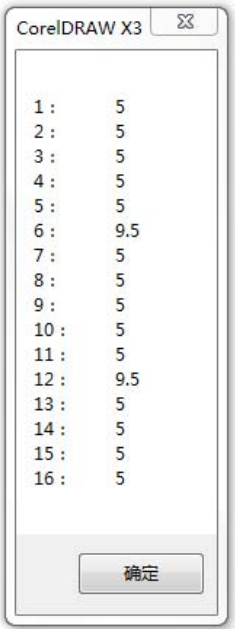

图 8 种群得分值显示框
Fig.8 Display box of population score values

3.5　种群换代

图 4 中的“种群换代”按钮将在评价方案后变为可用状态。方案的得分值，即其适应度。“淘汰”输入框是由设计师给出一个淘汰分值，即适应度阈值，得分高于该值的方案将进入下一轮，得分低于该值的方案则被全部淘汰。淘汰后产生的空缺将由新生成的子代填补。如输入 “7.5”，按图 8 的评分结果，6 号和 12 号方案将延续到下一代，其余十四个方案则被清除。然而，在它们被清除之前还有机会形成子代。种群换代机制见图 9。

首先，按得分高低，使用轮盘赌选择法，从种群中选出两个方案作为父本和母本。轮盘赌选择法是一种概率选择算法，该选择法的基本思想是将每个方案的得分拟作筹码，在轮盘上押格子。得分越高筹码就越多，押的格子数就越多，则获胜的概率也就越大。其原理如式(3)所示，P_i 为第 i 个方案被选作父本与母本的概率，S_i 为其方案得分，n 为群体个数。

$$P_i = \frac{s_i}{\sum_{j=1}^{n} s_j} \tag{3}$$

然后，使父本和母本进行交叉重组。其具体方式为构建子代的空编码，随机选择从父本或母本中获取每一种色彩。重复上述过程，直到所需子代全部生成完毕。

最后是变异过程。图 4 中的“变异”输入框的值表示产生变异的方案的比例，默认值 0.3 表示有 30%的方案会发生变异。具体做法是随机挑选 30%的方案，再按最大变化的比例（即 20%）修改其 RGB 值。

经过上述过程，虽然产生了新种群的编码，即十六组配色数据，但是此时新种群还未显示。若要展示新种群方案，则需要点击“展示新种群”按钮，程序将创建一个新页面，并且展示新种群的所有方案。该过程就是从基因型到表现型的解码过程。

新种群中的方案得分将被全部初始化为默认值，包括从旧种群中延续下来的方案。新种群生成后，可以不断通过方案评价进行循环、换代，直至产生满意的配色方案。

3.6　色彩洗牌

图 4 中的“色彩洗牌”按钮允许设计师对选中方案（只能选一个）的色彩进行“洗牌”，即各色区的色彩随机互换。这个按钮为设计师人工干预进化过程提供了操作入口。通过 “洗牌” 得到四款配色方案，见图 10，它们的七种色彩元素完全一样，只是赋色区域不同。通过手工操作的方式修改方案色彩是完全可以的，但 CorelDraw 软件提供了更便捷的方式，只需修改后仍然符合配色对象的要求即可。

4　案例应用

通过色彩体现文化特征是设计师进行配色时，经常考虑的设计表达方式。本文案例的设计内容是对图 5 中的平面图案进行配色设计，要求其配色符合敦煌壁画的色彩意象。首先，基于敦煌壁画图库提取特征色，以色彩网络的形式表达[15]，敦煌壁画图库及其提取色见图 11。

接着，从图库中提取十一种特征色，并用网络结构标出色彩间的共现关系。从十一种特征色中，随机选七种特征色进行填充，作为 IGA 的初始种群。基于提取色的初始种群见图 12。

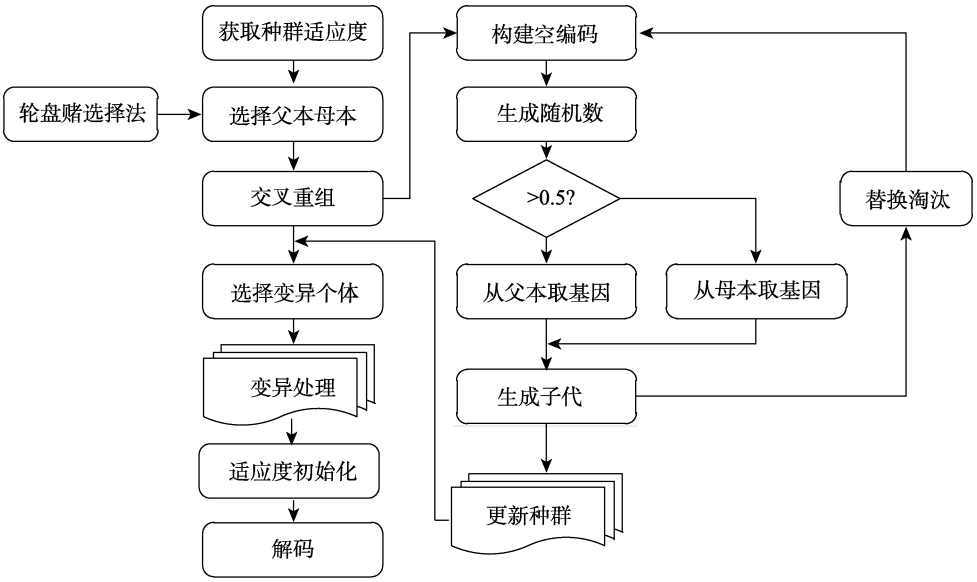

图 9　种群换代机制

Fig.9　Population replacement mechanism

图 10 配色方案
Fig.10 Color scheme

四次配色优化的 IGA 种群（部分）见图 13。在优化过程中，由于种群变异，出现了原始参考对象中没有的玫瑰色。设计师认为这种色彩使整体配色效果更加和谐（虽然敦煌壁画中没有出现同样的颜色），因此，选择其中的一款，在其基础上进行随机的“洗牌”处理，得到新一代种群，见图 14。种群不断进化，直到设计师寻找到满意的方案，设计师亦可在最满意的方案上进行人为的微调，进化次数是由配色目标的复杂程度决定的。此案例中，设计师最后得到满意的配色方案，见图 15。

5 结语

本文围绕设计师在配色设计过程中的实际需求展开研究，主要研究成果有三个方面。第一，给出了交互式遗传算法用于配色设计的完整流程，并且基于配色设计常用的矢量图像软件平台，开发了应用系统，进行了应用验证。第二，对配色设计中常用的“意象”指标，采取了迂回措施。让设计师选择一幅或一组能够体现配色意象的图片，让程序从中自动提取色彩并加以应用，从而回避了对色彩意象进行建模的艰难过程。第三，在交互式遗传算法过程中，不仅简化了设计师的评价方法，降低了疲劳感带来的评价不稳定性，而且设计了“洗牌”操作，允许设计师对种群方案进行灵活的主动干预。这增加了设计师在优化过程中的权限，体现了程序对设计师的“辅助”而非“取代”的作用。同时，本文提出的配色方法也有存在一些不足之处。第一，进化过程的部分参数没有对设计师开放，如变异尺度就统一为 20%。第二，用“洗牌”方案解决非等位基因交叉重组会带来一个问题，即在后续的组合过程中，可能会造成两个色区被赋予同一颜色的情况。这会产生一部分无效方案，影响进化效率。第三，目前该方法适用于为图形类对象配色，若将其应用至其他任务，如产品配色等，还需根据具体任务的特征对方法进行细分调整。在对参考图像配色方法的进一步研究中，上述问题仍需要分别加以完善。

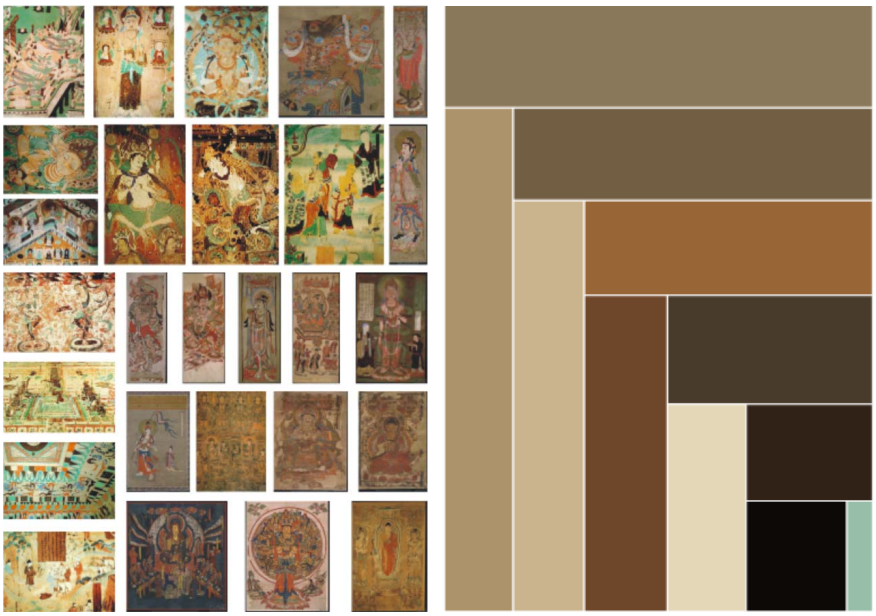

图 11 敦煌壁画图库及其提取色
Fig.11 Dunhuang murals map depot and the extracted colors

图 12 基于提取色的初始种群
Fig.12 Initial population based on the extracted colors

图 13　四次配色优化的 IGA 种群（部分）
Fig.13　Color matching optimized IGA population for 4 times (partial)

图 14　新一代种群
Fig.14　A new generation of population

图 15　满意的配色方案
Fig.15　The satisfactory color scheme

参考文献：

[1] 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-Target Bee Colony Optimization Algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(2): 381-389.

[2] 胡志刚，吕娜，乔现玲，等. BP 神经网络在产品配色中的应用研究[J]. 包装工程，2016，37(10): 136-141.
HU Zhi-gang, LYU Na, QIAO Xian-ling, et al. Application of BP Neural Network in Product Color Matching[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(10): 136-141.

[3] 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. Interactive Genetic Color Matching Design Driven by Color Semantics[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(5): 669-676.

[4] 张燕，余隋怀，陈登凯，等. 基于遗传蚁群算法的产品配色方法研究[J]. 图学学报，2013，34(3):79-84.
ZHANG Yan, YU Sui-huai, CHEN Deng-kai, et al. Research on Product Color Matching Based on Genetic Ant Colony Algorithm[J]. Journal of Graphics, 2013, 34(3): 79-84.

[5] XU B Q, LIU X J, LU C F, et al. Transferring the Color Imagery from an Image: A Color Network Model for Assisting Color Combination[J]. Color Res Appl, 2019, 44(1): 1-16.

[6] TAKAGI H. Interactive Evolutionary Computation: Fusion of The Capabilities of EC Optimization and Human Evaluation[J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(9): 1275-1296.

[7] 刘肖健，李桂琴，孙守迁. 基于交互式遗传算法的产品配色设计[J]. 机械工程学报，2009，45(10): 222-227.
LIU Xiao-jian, LI Gui-qin, SUN Shou-qian. Product Color Matching Design Based on Interactive Genetic Algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(10): 222-227.

[8] 巩敦卫，郝国生，周勇，等. 交互式遗传算法原理及其应用[M]. 北京：国防工业出版社，2007.
GONG Dun-wei, HAO Guo-sheng, ZHOU Yong, et al. Principles and Applications of Interactive Genetic Algorithms[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.

[9] 陈鹏，吕健，潘伟杰. 基于色彩方案重用的产品配色感性设计[J]. 工程设计学报，2015，22(6): 546-551.

CHEN Peng, LYU Jian, PAN Wei-jie. Product Color Matching Design Based on Color Scheme Reuse[J]. Journal of Engineering Design, 2015, 22(6): 546-551.
[10] O'CONNOR Z. Colour Harmony Revisited[J]. Color Research and Application, 2010, 35(4): 267-273.
[11] HSIAO S, TSAI C. Transforming the Natural Colors of an Image into Product Design: A Computer‐Aided Color Planning System Based on Fuzzy Pattern Recognition[J]. Color Res Appl, 2015, 40(6): 612-625.
[12] WANG M. A Study on Fuzzy C-Means Application in Austronesian Language Cultural and Creative Product Colors[J]. Color Res Appl, 2018, 43(3): 375-386.
[13] 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[J].中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(S2): 210-215.
GUO Yi-nan, YE Li, CHENG Jian. Multi-User Intelligent Color Matching Optimization Design Based on Collaborative Interactive Multi-agent Culture Algorithm[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013, 44(S2): 210-215.
[14] JONAUSKAITE D, ALTHAUS B, DAEL N, et al. What Color do You Feel? Color Choices are Driven by Mood[J]. Color Res Appl, 2019(44): 272-284.
[15] 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. Color Network Model and Color Matching Assistant Technology of Traditional Patterns[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(4): 899-907.

（上接第 165 页）

求，从病人、医生和技师的角度分析各个接触点，提升相关人员的使用体验。因为项目时间、经费和可行性等关系，有些病人需求暂未获得满足，所以在后续的设计中，将继续采用服务设计方法，不断优化社区康复站点的服务与产品。

参考文献：

[1] 王炜, 胡飞, 沈希鹏. 老龄心血管健康管理的产品服务系统设计研究[J]. 包装工程, 2018, 39(2): 22-25.
WANG Wei, HU Fei, SHEN Xi-peng. On the Product Service System Design of Cardiovascular Management for the Elderly[J]. Packing Engineering, 2018, 39(2): 22-25.
[2] 巩森森, 李雪亮, 肖东娟. 面向数字化社会创新的医疗健康服务设计[J]. 包装工程, 2015, 36(12): 24-28.
GONG Miao-sen, LI Xue-liang, XIAO Dong-juan. Health Care Service Design Towards Digital Social Innovation[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(12): 24-28.
[3] 辛向阳, 曹建中. 服务设计驱动公共实务管理及组织创新[J]. 设计, 2014(5): 124-128.
XIN Xiang-yang, CAO Jian-zhong. Service Design Drives Innovation of Public Affairs Management and its Organization[J]. Design, 2014(5): 124-128.
[4] 姚子颖, 杨钟亮, 范乐明. 面向工业设计的产品服务系统设计研究[J]. 包装工程, 2015, 36(18): 54-57.
YAO Zi-ying, YANG Zhong-liang, FAN Le-ming. Product Service System Design from the Perspective of Industrial Design[J]. Package Engineering, 2015, 36(18): 54-57.
[5] EZIO M. 设计, 在人人设计的时代[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016.
EZIO M. Design, When Everybody Designs[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
[6] WEI R, YANG Z. Design and Implementation of Doctor-Patient Interaction System Based on Android[J]. 2015 International Conference on Intelligent Systems Research & Mechatronics Engineering, 2015.
[7] 于壮云. 基于云康复系统的架构与测试[J]. 科学信息化, 2017(12): 179-180.
YU Zhuang-yun. Construction and Test of Cloud Rehabilitation System[J]. Technology and Information, 2017(12): 179-180.
[8] 谢文婷, 徐聪. 量化自我理念在个人健康管理产品设计中的运用[J]. 包装工程, 2016, 37(4): 79-83.
XIE Wen-ting, XU Cong. Application of Quantified Self Theory in Personal Health Management Products Design[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(4): 79-83.
[9] 赵超. 构建基于病人体验的健康产品-环境-服务设计创新[J]. 装饰, 2016(3): 12-18.
ZHAO Chao. Health Care Design Innovation on Product, Environment and Service: Towards Patient Experience[J]. Zhuangshi, 2016(3): 12-18.
[10] 袁晓芳, 吴瑜. 可持续背景下产品服务系统设计框架研究[J]. 包装工程, 2016, 37(16): 91-94.
YUAN Xiao-fang, WU Yu. The Framework for Sustainable Product-Service System Design[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(16): 91-94.