基于感性工学和交互式遗传的产品配色设计方法

刘征宏[1]，鄢吉多[1]，林芸[1]，王卫星[2]
（1.贵阳学院 机械工程学院，贵阳 550005；2.贵州大学 机械工程学院，贵阳 550025）

摘要：目的 为降低产品配色对设计经验等专业知识的依赖性，设计满足用户感性需求的配色方案。**方法** 提出结合感性工学和交互式遗传的产品配色设计方法。首先，使用融合和模糊处理方法，从源二维图像提取色彩配置方案，构成色彩方案库。然后，使用感性工学方法构建意象词汇和单个色彩的映射模型，从而获得色彩的意象贡献值。在此基础上，构建以色彩意象贡献因子和用户交互评价值为依据的适应度函数，以色彩调和度评价为约束条件，设置初始条件，使用交互式遗传算法进行配色方案的推进及优化，直至获得满足用户感性需求的配色方案。并以某企业某款数控机床产品的配色设计为例，对此方法进行了验证。**结论** 结果表明，该方法能有效地获得使用户满意的产品配色方案。通过结合感性工学，可获得满足用户感性需求的产品配色设计方案，同时拓展了感性工学方法的应用范围，并且遗传进化操作简单，降低了配色设计对于专业知识的依赖。

关键词：感性工学；交互式遗传；配色设计；色彩意象
中图分类号：TB472 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2019)20-0088-07
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.20.014

Product Color Design Method Based on Kansei Engineering and Interactive Genetic Algorithm

LIU Zheng-hong[1], *YAN Ji-duo*[1], *LIN Yun*[1], *WANG Wei-xing*[2]
(1.School of Mechanical Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China;
2.School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

ABSTRACT: The paper aims to design a color scheme meeting users' perceptual needs and reduce the dependency on designers' experience or other professional knowledge in color design of product. A method combining kansei engineering (KE) and interactive genetic algorithm (IGA) was proposed. Firstly, color scheme database was constructed with color merging and fuzzy processing techniques by extracting the color scheme from two-dimensional source images. Then, the color image contribution values were calculated by the KE mapping model of mage words and individual color. Finally, the fitness function based on the color image contribution values, color harmony and user's evaluation was constructed. With evaluation on color harmony as the constraint condition, the initial condition was set to promote and optimize the color scheme with IGA till satisfactory color scheme was generated. Application process and procedure of the proposed method were described by color design of a numerical control machine tool. The case study results show that the proposed method was effective. By combining with KE, color scheme which meets the user's emotional needs can be obtained, and the application scope of the KE is expanded. As the genetic evolution operation is simple, the color scheme will rely less on professional knowledge.

KEY WORDS: kansei engineering; interactive genetic; color design; color image

收稿日期：2019-05-21
基金项目：国家自然科学基金（51465007）；贵州省教育厅青年科技人才成长项目（黔教合 KY 字[2017]239）；贵阳学院博士科研启动项目（GYU-ZRD [2018]-003）；贵州省科技厅基础研究计划（黔科合 LH(2017)7232）；贵州省教育厅重点项目（黔教合 KY 字[2014]278）；贵州大学学术新苗培养及创新探索专项（黔科合平台人才[2017]5788）
作者简介：刘征宏（1987—），男，湖南人，博士，贵阳学院机械工程学院副教授，主要从事数字化设计与制造、产品感性设计等研究。

产品配色作为产品设计中重要的组成部分，对产品的风格和意象定位具有至关重要的作用。现阶段，相关专家和学者更关注产品造型设计方法研究，而产品配色设计主要由专业设计人员根据其设计经验完成，因此，其设计的智能性和准确性都有待提高。目前，对产品配色设计的研究主要集中在两个方面。一方面，研究使产品获得多种不同配色方案的方法[1-4]，主要是通过从二维图像获得大量的色彩配置方案，并构建用于三维产品配色设计的色彩配置方案库；另一方面，研究用户对各配色方案的评价及优化方法[5-11]，主要使用遗传算法、神经网络、模糊层次分析、蚁族算法、灰色关联分析等智能计算机方法，对配色方案进行评估及优化、改进。无论是对配色方案生成方法的研究，还是对色彩设计进行评价及优化的研究，都应该结合用户参与度，对用户色彩情感进行研究，从而提高获得满足用户色彩情感设计方案的可能性。这是目前的研究所欠缺的。感性工学多用于产品形态的设计和研究，在对产品进行解构并获得其意象的基础上，构建感性工学模型，从而指导产品情感设计[12,13]。交互式遗传算法在考虑传统进化算法优势的同时，结合用户交互评价值，使进化结果更符合用户需求，并且具有操作简单、快速收敛的特点。本文通过使用感性工学方法，获得每个色彩及方案的情感意象；通过使用交互式遗传方法，让用户选择方案进化方向，并确定收敛结果。最终，可获得满足用户情感的配色设计方案。

1　色彩方案获取

产品配色方案主要由三个参数，即色彩种类数、色彩 RGB 值（色彩的基本模式有 RGB 模式、CMYK 模式、Lab 模式等，本文以 RGB 模式为例进行说明）、色彩面积比[14]组成。色彩方案获取可归纳为两个步骤。一是合并，合并算法已经比较成熟，可使用一般图像处理软件来完成；二是选择，即根据各色彩面积的比例，保留占比大、对整体效果有显著影响的色彩，删除比例小、可忽略的色彩。色彩配置方案提取流程见图 1。

对图像进行合并后，根据公式

$$k_i = \frac{p_i}{AB} \tag{1}$$

对图像各色彩比值进行计算。式中，k_i 是合并后各色彩的比值；p_i 是某色彩像素；A 和 B 则分别代表源二维图像的长、宽像素数。

图 1 中的 k_1 为杂色临界值，用于去除杂色，小于 k_1 则可视为杂色被去除；k_2 为“点睛色”临界值。在对占比小的色彩进行取舍时，需判断其是否为“点睛色”。本文通过计算和比较占比小的色彩与所提取的占比大的色彩之间的欧式距离进行识别，从而保留“点睛色”，删除杂色。对色彩比例满足大于 k_1 小于 k_2 的色彩进行判断。

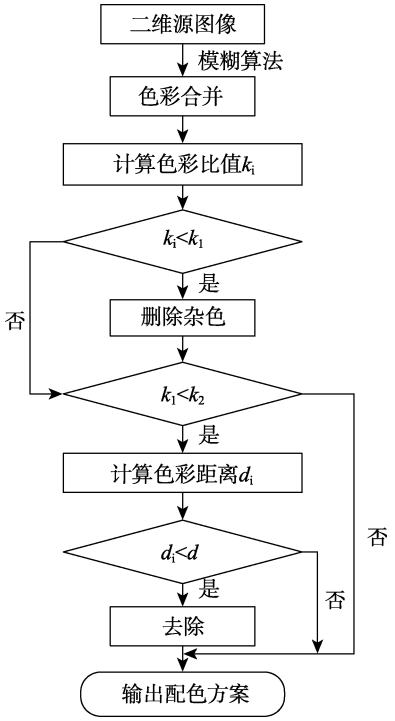

图 1　色彩配置方案提取流程
Fig.1　Color scheme extraction approach

定义色彩之间的欧式距离

$$D_{ij} = \sqrt{(X_{rj} - X_{ri})^2 + (X_{gj} - X_{gi})^2 + (X_{bj} - X_{bi})^2} \tag{2}$$

式中：D_{ij} 为第 i 个色彩与第 j 个色彩之间的欧式距离；X_{ri}、X_{gi}、X_{bi} 分别为占比小的色彩中第 i 个色彩的 RGB 值；X_{rj}、X_{gj}、X_{bj} 分别为配置方案中第 j 个色彩的 RGB 值。

若占比小的色彩满足 $\min(D_{ij}) > D$（其中 D 为欧式距离阈值），则该色彩为“点睛色”，予以保留；相反，若满足 $\min(D_{ij}) < D$，则该色彩为杂色，予以删除。

该处理方法不仅降低了源二维图像的色彩数量，使其能满足产品配色需求，而且保留了源二维图像的“点睛色”，使其源色彩风格得到了最大程度的保留，从而为产品配色设计提供了有效的配置方案。

2　基于感性工学的色彩意象贡献度计算

2.1　确定意象词汇

收集能从不同层面来描述目标色彩配置方案意象的形容词，作为实验变量，以构建用户对于色彩方案的多维认知空间。首先，通过查阅相关文献或其他方法获取大量意象词汇。然后，筛选初步收集的意象词汇，并且分类。使用卡片分析法，根据意象词间的亲密程度，对其进行分析及分组。使用主成分分析法，按各指标贡献率从每组中选择一个最具代表性的意象词汇，一般最终筛选出 6~8 个感性词[15]。

2.2 建立情感意象认知空间

通过用户调查来完成对情感意象认知空间的建立。选择差异性大并能包含所有特征的几个配置方案，在获取的感性设计空间（意象词汇组成）基础上，构建语义差异量表，将配置方案的每一个单独色彩与语义差异量表相互对应，形成实验调查问卷[16]。

对某一组感性词汇来说，让受测者对每个配置方案进行实验，得到测试者对每个配置方案的感性评价，这些评价值组成感性意象认知空间。设第 m 个评价者对第 n 个意象词汇评价配置方案 i 的情感意象认知向量为 $\left\{A_1^{m,n}A_2^{m,n}\cdots A_i^{m,n}\right\}$，其中 $A_i^{m,n}$ 为第 m 个受测评价者对第 n 个感性词汇第 i 个配置方案的评价值，那么这些评价值所构成的感性意象认知空间如下。

$$\begin{bmatrix} A_1^{m,n} & A_1^{m,n} & A_1^{m,n} & \cdots & A_1^{m,n} \\ A_2^{m,n} & A_2^{m,n} & A_2^{m,n} & \cdots & A_2^{m,n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ A_i^{m,n} & A_i^{m,n} & A_i^{m,n} & \cdots & A_i^{m,n} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中：$A_i^{m,n}$ 为第 m 个受测者对第 n 个意象词汇第 i 个配置方案的感性评价值，则所有受测者的评价值形成了一个多维意象认知空间。设所有受测者对第 n 个意象词汇第 i 个配置方案的感性评价平均值为 $\dfrac{\sum_{m=1}^{q}A_i^{m,n}}{q}$，其中 q 为受测者数量。

2.3 基于线性回归的色彩语义贡献度计算

在 KE 中，通常使用多元回归分析（Regression Analysis）构建意象词汇与单个色彩之间的线性关系[17]。

在数量化 I 类理论中[18]，因变量 y_n 与自变量 x 是线性相关的，对每组感性词，y_n 为每个配置评价方案的感性评价平均值，即 $\dfrac{\sum_{m=1}^{q}A_1^{m,n}}{q}$，$x$ 为各单独色彩，构建了如下式的函数关系。

$$y_i=\sum_{j=1}^{r}\sum_{k=1}^{C_j}a_{jk}\delta_i(j,k)+\varepsilon_i \tag{4}$$

式中：a_{jk} 为第 j 项目中第 k 类目的系数值；ε_i 为残差；C_i 为各个项目的类目数；$\delta(j,k)$ 可有下式求得：

$$\delta(j,k)=\begin{cases}1 & \text{当第}i\text{样品中,第}j\text{项目的定性数据为第}k\text{类目时} \\ 0 & \text{否则}\end{cases} \tag{5}$$

式中：j 为项目；k 为类目；$\delta(j,k)$ 为第 j 项目中第 k 类目在第 i 样品中的反应。

通过式（3），将配置方案的色彩组成定性数据，转化为以 1 和 0 表示的定量数据。

使用 SPSS 统计软件，进行多元线性回归分析，求出 α_{jk} 的值，即为所求色彩语义贡献度。

3 区域差异下的色彩调和度评价

根据美度公式[19] $M=O/C$（M 为调和度；O 为颜色序；C 为颜色复杂度），使用色相 h，亮度 v 和彩度 c 三个参数计算调和度。然而这样会忽略色彩的位置关系。为了弥补这一问题，如赋色区域位置相邻，按单个色彩的感性意象贡献值进行排序。贡献值大的区域叫主色彩区域；贡献值小的叫次色彩区域。得到着色区域差异影响下的调和度评价方法：$M=O/C$，$C=C_m+C_h+C_v+C_c$，$O=\sum(G+O_h+O_v+O_c)$。其中 C_m 为色彩配置方案的色彩种类数；C_h、C_v、C_c 表示 h、v、c 差值下的色彩对数；O_h、O_v、O_c 分别表示 h、v、c 差值确定的秩序因数。

若一个配置方案由 n 种色彩组成，则 M（调和度评价）的取值范围为 $-n\sim n$，根据 Moon 和 Spencer 的理论[20]，定义式（6）所示的色彩配置方案调和度修正评价值。

$$\begin{cases}H=0, & \text{if } \mathrm{M}<0 \\ H=M, & \text{if } 0\leqslant \mathrm{M}<0.5 \\ H=0.5+\dfrac{1}{2n-1}(\mathrm{M}-0.5), & \text{if } \mathrm{M}\geqslant 0.5\end{cases} \tag{6}$$

式中：H 为调和度修正评价值；M 为调和度评价值。

4 配色交互式遗传操作

交互式遗传算法利用遗传算法全局优化的特点，让用户对进化结果进行评价，将设计师的设计知识融入计算机技术，从而保证了方案以用户需求为目的，并且使其达到最优化。本文利用此算法，以意象分值、用户评价分值和调和度评价对方案种群进行适应度评估，最终得到用户满意结果。交互式遗传操作流程见图 2。

首先，用户确定需要进行配色的目标产品和几对意象词组作为初始种群。然后，构造综合意象得分、用户评价得分和调和度评价得分的适应度函数，从而获得每个色彩方案的适应度值，根据结果进行判断。如果获得满足用户需求的方案，则输出相应的配色设计方案；否则，使用遗传算法最优简单保存策略（Optimum Maintaining Simple Genetic Algorithm，简称 OMSGA），保存每一代种群中适应度值最高的至下一代，其他的个体方案则进行遗传进化操作，如选择、交叉、变异等。具体的交互操作过程中，用户首先设置意象语义目标和相关权重，相关权重包括用户评价、色彩意象分值和色彩调和度三个参数。然后，用户通过输入“–5~5”的整数值，对新一代种群进行评价，评价完成后，点击“下一代”，系统会在上一代的优良个体基础上，进行遗传优化。最后，系统会产生符合用户意象的配色设计方案。

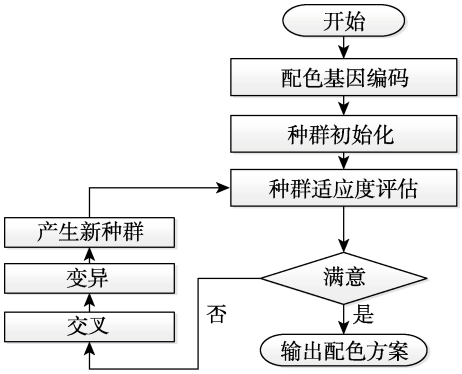

图 2　交互式遗传操作流程
Fig.2　Interactive genetic operation approach

4.1　种群适应度求解

在遗传操作的过程中，使用适应度函数对个体（配色）方案的优劣进行衡量。函数值越大说明个体方案越优，越满足用户的情感期望；反之则越劣，有可能会被淘汰。本文创建了由意象分值、用户评价分值和调和度评价三部分组成的适应度函数，设其为 F_w，则

$$F_w=\begin{cases}(1-\alpha)F_s+\alpha H,\ H\in(0.2,\ 1],\alpha\in[0,1]\\ 0 \qquad\qquad H\in[0,\ 0.2]\end{cases} \tag{7}$$

$$F_s=\beta G_A+(1-\beta)F,\ \beta\in[0,1] \tag{8}$$

式中：G_A 为色彩意象得分；F 为用户交互评价得分；F_s 为 G_A 和 F 的线性加权和；H 为调和度得分；α、β 为调和度权重、意象权重，根据具体需求或偏好，用户可在系统中进行设置，从而获得不同的配色方案。

为了使获得的配色方案具有一定的调和度，设置当 $0\leqslant H\leqslant 0.2$ 时，$F_w=0$。

F 和 G_A 的计算方法如下。首先，由用户指定配色方案所反映的期望色彩意象词汇，并根据用户的偏好，设定各意象词汇相应的权重系数 f_i，$\sum_{i=1}^{n}f_i=1$。另设 A_{xy} 为配色方案中第 x 种色彩在意象词汇 y 下的得分，则 $G_A=\sum_{i=1}^{n}f_i\sum_{t=1}^{m}A_{xy}$，其中，$m$ 表示配色方案中具有的总色彩数。设用户在各意象词汇下对配色方案的评价分值为 P_i，$i=1,2,\cdots,n$，则 $F=\sum_{i=1}^{n}f_iP_i$，其中，n 表示描述色彩方案的意象词汇数量。

4.2　配色基因编码

进行配色遗传操作之前，产品被分成不同的配色部件。当其在遗传操作过程中保持不变，即称静态属性；当每个配色部件所对应的色彩意象贡献度在遗传操作过程中，不断地迭代、更新，则称为动态属性。因此，将染色体分成静态基因位和动态基因位，可直观地显示配色结果。定义 $\{(G_1,C_1),(G_2,C_2),\cdots,(G_n,C_n)\}$，$G_i$ 为第 i 个待配色的产品部件，C_i 为第 i 个色彩数据，$C_i=\{(id),(RGB),(CF_1,CF_2,\cdots,CF_i,CF_n)\}$，$CF_i$ 表示该色彩对应的色彩语义贡献因子，即前文所述的 a_{jk}。其染色体结构见图 3。

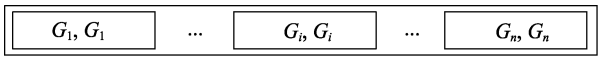

图 3　染色体结构
Fig.3　Chromosome structure

5　实例验证

5.1　色彩提取

以数控机床的配色设计为例，运用本文所提到的方法进行产品配色设计。通过广泛地搜集优秀产品配色设计的二维图片，按照上述的方法，对色彩进行提取，从而建立由大量提取出的配色方案所构成的方案库。使用刘肖健老师团队开发、基于 CorelDRAW 平台的色彩提取插件[16]对某品牌的电钻产品进行了色彩提取。在 CorelDRAW 软件中，打开此插件，先点击 Load Pic 按钮，加载源图片。源图有六种色彩，因此在色彩数框内输入 6（去除白色实际只有 5）。再选择色相序列模式，点击 Go 按钮，即可获得色标栏下的提取色及面积比例。色彩提取的过程与结果见图 4。

对于存在渐变区块的源图色彩来说，提取色彩后，需要根据设计经验对所提取的色彩进行适当地修正。提取色修正见图 5，如图 5a 为从某一产品提取出的配色，即某提取色的 RGB 色值与面积比例；图 5b 为修正后的提取色。选择图 5b 中的五种色彩作为配色方案。

5.2　色彩意象贡献度计算

首先，通过文献查证、采访调研等手段,获得六十多个意象词汇。在首次筛选后，使用卡片分析法，将剩余的四十八个意象词汇分成七组。使用主成分分析法，获得每组中最具有代表性的意象词汇，得到意象词汇筛选结果，见表 1。最终获得七个意象词汇（表 1 中的加粗词汇），即优雅、欢快、现代、简洁、协调、深沉、热烈。

根据色彩提取方法，获得了多种色彩配置方案，并形成色彩配置方案库。从色彩配置方案库中，随机地抽取了一百二十套配置组合方案。然后，邀请了参与意象词汇筛选的老师和学生（共三十人），分别使用筛选出的意象词汇，对这套色彩配置方案进行了评价。使用语义差分量表，在不同意象词汇下，让所有被试分别对每个配置方案进行评价、打分，计算每个配色方案在每组意象词汇下所得的平均评价值（评价得分总值/被试人数）。根据前文所述的方法，构建了

基于线性回归的感性工学模型，从而获得了每个配色方案中每单种色彩的意象贡献度。由于数据量太大，不便于展示，所以任选了其中的两个方案进行结果展示。其中两个配置方案中的各单独色彩的意象贡献度见表 2（表 2 中的方案 2 包含了图 5b 的五种色彩）。贡献度越大表示越符合该意象，反之则越不符合。

图 4 色彩提取的过程与结果

Fig.4 Process and result of color extraction

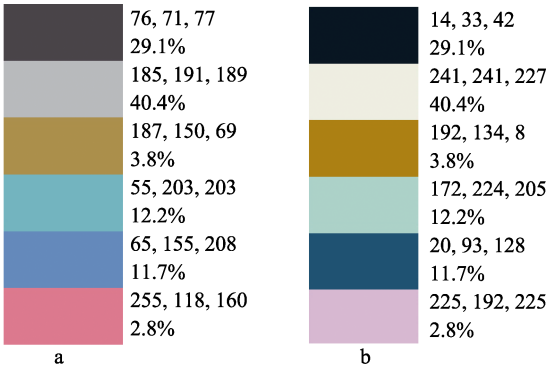

图 5 提取色修正

Fig.5 Modification of extracted color

表 1 意象词汇筛选结果

Tab.1 Screening results of image words

	类别 1	类别 2	类别 3	类别 4	类别 5	类别 6	类别 7
意象词汇	精致	可爱	潮流	低调	柔和	严肃	强烈
	含蓄	愉悦	**现代**	平淡	暖和	灰暗	大胆
	大气	明亮	时髦	**简洁**	亲和	低沉	醒目
	优雅	个性	活泼	朴素	**协调**	沉重	**热烈**
	古典	**欢快**	时尚	自然	舒服	压抑	激情
	高贵	年轻	快乐	清淡		**深沉**	刚性
	典雅	积极		轻盈		凝重	
		活力					
		轻松					

表 2 其中两个配置方案中各单独色彩的意象贡献度

Tab.2 Image contribution of each color in two schemes

方案	色彩配置	色彩 RGB 值			意象词汇贡献值						
		R	G	B	优雅	欢快	现代	简洁	协调	深沉	热烈
色彩方案 1		161	161	161	–0.42	–0.64	0.56	0.18	0.27	0.51	0.12
		150	136	131	–0.39	–0.7	0.15	0.06	–0.28	0.42	0.23
		121	0	0	0.56	–0.18	–0.02	–0.31	0.15	0.35	0.65
		15	13	39	0.4	–0.68	–0.35	–0.24	0.05	0.62	0.54
		30	23	17	0.43	–0.56	0.45	0.37	0.29	0.84	0.32
色彩方案 2		241	241	227	0.62	0.54	0.35	0.48	0.27	–0.45	–0.42
		225	192	225	0.74	0.42	0.41	0.39	0.19	–0.32	–0.36
		172	224	205	0.53	0.37	0.26	0.27	0.08	–0.61	–0.38
		20	93	128	0.65	0.12	0.07	0.19	0.28	0.19	–0.15
		14	33	42	0.31	–0.26	0.35	0.6	0.55	0.64	0.48

5.3 交互遗传操作

基于 Visual Studio，以单点交叉的方式，进行原型系统开发，并作系统设置：种群数=6，交叉概率=0.7，变异概率=0.1。数控机床配色设计交互式遗传操作界面见图 6。首先，用户需选择意象词汇组合。然后，用户设置相关权重，再使用“–5~5”的整数值，对新配色方案在对应的意象词汇下完成评价打分，并点击“下一代”。之后，应重复该过程，直到获得用户满意的配色设计方案。图 6 显示了部分产品遗传进化结果。

图 6　数控机床配色设计交互式遗传操作界面

Fig.6　Interactive genetic operation interface for color design of CNC machine tool

色彩意象得分、用户评价得分和色彩调和度三个参数的权重设置是生成不同方案的关键。例如，当用户为经验丰富的配色设计人员时，可适当增加用户评价权重，从而获得个性化的配色方案；而当用户为非专业的配色设计人员时，可适当增加意象得分和色彩调和度权重，从而获得一些普通的配色方案。由于初始方案不同，不同的意象词汇组合会得到不同的配置方案。例如，选择“优雅”和“欢快”的意象词汇组合，可获得“优雅”和“欢快”的进化结果，见图 7。选择“简洁”和“深沉”的意象词汇组合，可获得“简洁”和“深沉”的进化结果，见图 8。由此可见，如果评价结果（即进化方向）不一样，相同的意象词汇组合也会得到不同的配色方案。

图 7　“优雅”和“欢快”的进化结果

Fig.7　"Grace" and "cheerfulness" evolutionary results

图 8　“简洁”和“深沉”的进化结果

Fig.8　"Simplicity" and "deep" evolutionary results

6　结语

使用感性工学和交互式遗传相结合为产品配色设计提供了一种新的方法，感性工学方法可计算各色彩的贡献因子，而交互式遗传方法可通过构造适应度函数，设置约束条件、初始值，为用户提供可参考的

配色设计方案。由于用户的感性意象存在复杂性和变化性，因此该方法所得配色结果具有不确定性和模糊性。该方法是本人在感性工学方法研究工作的基础上结合交互式遗传算法进一步对产品配色设计研究的成果。该方法能获得满足用户感性需求的可参考的产品配色设计方案，拓展了感性工学方法的应用范围；遗传进化操作简单，降低了配色设计对于专业知识的依赖，提高了产品配色设计效率。更加智能化、专业化的产品配色设计方法将是本课题深入研究的方向。

参考文献：

[1] LUO M R. Applying Colour Science in Colour Design[J]. Optics & Laser Technology, 2006, 38(4): 392-398.

[2] 王可，陆长德，乐万德，等. 基于 Lab 均匀色彩空间的色彩调和系统[J]. 西北工业大学学报，2004，22(6): 695-699.
WANG Ke, LU Chang-de, YUE Wan-de, et al. Color Harmony System Based on Lab Perceptual Uniform Color Space[J]. Journal of North Western Poly Technical University, 2004, 22(6): 695-699.

[3] 王可，余隋怀，乐万德，等. 面向计算机辅助工业设计的色彩设计系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(10): 1425-1429.
WANG Ke, YU Sui-huai, YUE Wan-de, et al. Color Design System for Computer-aided Industrial Design[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2004, 16(10): 1425-1429.

[4] 刘肖健，曹愉静，赵露唏. 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(4): 899-907.
LIU Xiao-jian, CAO Yu-jing, ZHAO Lu-xi. Color Networks of Traditional Cultural Patterns and Color Design Aiding Technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016(4): 899-907.

[5] 李永锋，朱丽萍. 基于模糊层次分析法的产品配色设计[J]. 机械科学与技术, 2012(12): 2028-2033.
LI Yong-feng, ZHU Li-ping. Product Color Design Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012(12): 2028-2033.

[6] 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(6): 546-551.
CHEN Peng, LYU Jian, PAN Wei-jie. Product Color Design Based on Reuse of Color Scheme[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2015(6): 546-551.

[7] 孙菁，陈安全，王少梅. 基于遗传神经网络的产品配色设计[J]. 工程设计学报, 2007(3): 243-246.
SUN Jing, CHEN AN-quan, WANG Shao-mei. Research on Construction of Color Design System Based on Neural Network and Genetic Algorithm[J]. Journal of Engineering Design, 2007(3): 243-246.

[8] 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(3): 79-84.
ZHANG Yan, YU Sui-huai, CHEN Deng-kai, et al. The Method Study of Harmonizing Colors in Product Based on Genetic-ant Colony Algorithm[J]. Journal of Graphics, 2013(3): 79-84.

[9] 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(5): 669-676.
LIU Jiong-zhou, LI Ji-tuo, LU Guo-dong. Color Scheme Design Through Color Semantic and Interactive Genetic Algorithm[J]. Journal of Computer-Aided Design Computer Graphics, 2012(5): 669-676.

[10] 孙志学. 基于灰色关联分析的产品色彩方案多意象优选[J]. 机械设计, 2015(1): 120-122.
SUN Zhi-xue. Multiple Image Selection of Product Color Schemes Based on Grey Relational Analysis[J]. Journal of Machine Design, 2015(1): 120-122.

[11] 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(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(3): 491-495.

[12] NAGAMACHI M. Kansei Engineering: A New Ergonomic Consumer-oriented Technology for Product Development[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1995, 15(1): 3-11.

[13] 苏建宁，王鹏，张书涛，等. 产品意象造型设计关键技术研究进展[J]. 机械设计, 2013(1): 97-100.
SU Jian-ning, WANG Peng, ZHANG Shu-tao, et al. Research Progress on Key Technologies of Product Image Modeling Design[J]. Journal of Machine Design, 2013(1): 97-100.

[14] 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(10): 222-227.
LIU Xiao-jian, LI Gui-qin, SUN Shou-qian. Color Mapping Design from Image to 3D Product Model[J]. Journal of Mechanical engineering, 2009(10): 222-227.

[15] SCHÜTTE S T W, EKLUND J, AXELSSON J R C, et al. Concepts, Methods and Tools in Kansei Engineering[J]. Theoretical Issues in Ergonomics Science, 2004, 5(3): 214-231.

[16] 刘征宏，谢庆生，黄海松，等. 多维变量感性工学模型构建及其性能评估[J]. 四川大学学报：工程科学版, 2016, 48(2): 198-206.
LIU Zheng-hong, XIE Qing-shen, HUANG Hai-song, et al. Construction and Performance Evaluation for Multi-dimensional Variable KE Model[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2016, 48(2): 198-206.

[17] 刘征宏，谢庆生，李少波，等. 基于潜在语义分析和感性工学的用户需求匹配[J]. 浙江大学学报：工学版, 2016, 50(2): 224-233.
LIU Zheng-hong, XIE Qing-shen, LI Shao-bo, et al. User Needs Matching Based on Latent Semantic Analysis and Kansei Engineering[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2016, 50(2): 224-233.

[18] YANG S M, NAGAMACHI M, LEE S Y. Rule-based Inference Model for the Kansei Engineering System[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 1999, 24(5): 459-471.

[19] TSAI H C, CHOU J R. Automatic Design Support and Image Evaluation of Two-coloured Products Using Colour Association and Colour Harmony Scales and Genetic Algorithm[J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(9): 818-828.

[20] MOON P, SPENCER D E. Area in Color Harmony[J]. Journal of the Optical Society of America (1917-1983), 1944, 34(2): 93.