

可适应布局形式变化的产品色彩设计研究

丁满, 李紫君, 裴卉宁, 马洪坤
(河北工业大学, 天津 300401)

摘要: **目的** 为解决当前产品色彩设计过早确定布局形式而导致的产品色彩设计方案片面性问题。**方法** 提出运用产品象元理论和BP神经网络实现适应不同布局形式变化的色彩方案设计的方法。首先,运用产品象元理论分析产品样本,运用象元运算法则确定不同布局形式方案,在此基础上进行色彩设计,建立不同布局形式的色彩方案样本库;其次,通过问卷调查对色彩样本库进行量化,设置神经网络结构,运用BP神经网络建立不同布局形式的色彩设计方案的评价模型;最后,以数控机床色彩布局设计研究为例验证该方法的可行性。**结论** 该方法以一种模块化的方式研究了不同布局形式的变化,能够有效地扩展设计思路,提出更加客观地适应布局形式变化的设计方案,提升色彩设计的成功率。

关键词: 工业设计; 色彩设计; BP神经网络; 象元理论; 数控机床

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)16-0103-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.16.014

Product Color Design Adapting to the Change of Layout Form

DING Man, LI Zi-jun, PEI Hui-ning, MA Hong-kun
(Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

ABSTRACT: In order to solve the problem of the one-sidedness of the product color design scheme caused by the premature determination of the layout form of the current product color design, a method of color scheme design based on product Meta symbol theory and BP neural network to adapt to the change of different layout forms is proposed in this paper. First, using the product Meta symbol theory to analyze the product sample and operation rules of Meta symbol to determine the different layout form scheme, on the basis to carried out the color design, and the sample base of color scheme with different layout forms is established. Next, the sample database is analyzed by questionnaire survey. The method is used to study the variations of different layout forms in a modular way, which effectively expands the design ideas. And more objective design scheme adapted to the change of layout form is proposed, improving the success rate of color design.

KEY WORDS: industrial design; color design; BP neural network; Meta symbol theory; CNC machine

数控机床作为自动化的高新技术产业的基础、产品制造业的核心设备,主导着国家工业化发展^[1]。在进行数控机床外观设计时,数控机床色彩是产品外观设计的重要组成部分,是影响产品外观质量最快速、最刺激、最显著的因素,因此数控机床色彩设计极为重要^[2-3]。

利用计算机智能算法辅助产品色彩设计是目前研究的热点^[4-7]。Wen等^[8]将具有自然色彩的图像转换为产品设计,建立了一套自然色彩规划系统。Tsai等^[9]运用灰色理论的情感评价方法和色彩和谐的审美评价方法辅助产品色彩设计。Oztekin等^[10-11]在工业产品的设计阶段运用感性工学提取用户需求并以此为

收稿日期: 2021-05-06

基金项目: 河北省社会科学基金项目(HB20YS046)

作者简介: 丁满(1979—),女,黑龙江人,博士,河北工业大学建筑与艺术设计学院副教授,主要研究方向为产品色彩情感设计、感性工学。

通信作者: 裴卉宁(1986—),女,山东人,博士,河北工业大学讲师,主要从事人因可靠性、舒适度研究。

依据进行色彩设计。Ding 等^[12-13]通过运用 K 近邻算法推荐符合用户目标图像的色彩设计方案,充分考虑了色彩对用户需求的影响。吕娜等^[14-15]运用 ERP 等认知技术与感性工学等智能算法,明确产品色彩搭配与其感性意象之间的关系,提出了产品双色配色的关联模型,指导设计师进行色彩搭配方案设计。冯青等^[16]运用案例分析法和神经网络进行产品配色设计,实现产品的智能配色。刘征宏等^[17]运用感性工学和交互式遗传算法进行配色方案的推进和优化,寻找最优色彩设计方案。薛磊等^[18]运用灰色关联分析法探讨了产品色彩与感性意象的相关性,以高速列车座椅为例构建出产品色彩的设计决策系统,为色彩设计提供了参考。以上研究都利用智能算法对色彩设计方案的生成和评价进行了改进,但是其主要形式都是先确定一种布局形式,然后寻找该形式下色彩设计的最优解,具有一定的局限性,对于不同色彩布局形成的其他设计方案并未进行关注,这会错失其他布局形式下的好的设计方案,限制色彩设计的创新性发展。

基于此,本研究将象元理论与 BP 神经网络^[19-23]相结合运用到产品的色彩布局设计研究中,提高设计师对用户意象的了解度,根据不同布局形式提出不同的色彩设计方案,多线研究并进,使色彩设计方案更加全面,扩展设计思路,提升产品色彩设计的成功率。

1 建立基于象元理论的产品色彩样本库

产品色彩样本库的建立主要包括收集产品样本,分析样本的色彩布局以及色彩元素,运用象元运算法则对初始元素进行合成运算等步骤。

1.1 产品样本分析

在收集样本之后,运用聚类分析对样本进行分类。主要过程为根据定义把配色分区数据相近的样本归为一类,而差异过大的其他样本隶属于不同的类别,然后将得出的数据运用 SPSS 软件对分区数据进行聚类分析,得出其代表性样本。

1.2 运用象元理论生成布局分区样本

象元理论主要用于分析产品形态设计。2016年,吴俭涛^[22-23]运用象元理论进行轮毂形态的设计,实现了产品新形态的智能生成。本研究采用骨-面象元,对数控机床的产品形态进行分析,建立新形态的产品布局样本库。

“象元”用以表达复杂物体形态所具有的多种形态特征,研究中将其与产品的配色分区设计相结合,将不可再分割的色彩区域称之为布局分区元素。象元形态分析法中的象元由五对对立互补的象元组成,研究中采用骨-面象元研究数控机床布局分区形态的变

化,得出布局分区元素库:

$$M = \begin{bmatrix} Ma_{1-k}, Ma_{2-k}, Ma_{3-k} \cdots Ma_{x-k} \\ Mb_{1-k}, Mb_{2-k}, Mb_{3-k} \cdots Mb_{x-k} \\ Mc_{1-k}, Mc_{2-k}, Mc_{3-k} \cdots Mc_{x-k} \\ Md_{1-k}, Md_{2-k}, Md_{3-k} \cdots Md_{x-k} \end{bmatrix}$$

象元运算指的是不同象元元素库之间的映射关联关系的规则,也是象元形态设计法的基础。象元之间有不同的关联方式,通过不同方式的联结会生成不同新的合成象元,从而满足不同消费者的诉求。运算法则主要分为三种,分别为合并运算、替换运算和插值运算。本研究主要研究数控机床不同布局形式的色彩设计,因此主要采用合并运算法则,将得出的布局形态元素运用象元合并运算法则进行合并运算,通过多个象元合并生成布局分区样本。

1.3 构建色彩样本库

色彩主要有色相、饱和度和亮度三大要素构成,人眼所看到的色彩都是这三个元素共同作用的综合效果。本研究将提取到的色彩样本以这三个要素为基础进行分析和总结,构建色彩元素库。将收集的样本图片在 PHOTOSHOP 中通过拾色器对色彩进行数据化处理,统计制表。将色彩元素库分为两组进行元素库构建。其中无色色彩库 S1 主要通过计算其平均值建立。有色色彩库 S2 通过定变量变换建立。将饱和度和亮度设为定量 B 和 V,在保持 B 和 V 为一定数值的前提下,色相设为自变量 H:

$$H_i = i \times 30^\circ \quad (1)$$

式中, $i \in \{0 \sim 11\}$ 。

色彩为因变量 S (B, V, H)。将三大元素数值输入 PHOTOSHOP 的拾色器,得出色彩元素库 S2:

$$S1 = \{S1_1, S1_2, S1_3\}$$

$$S2 = \{S2_1, S2_2, S2_3 \cdots S2_i\}$$

为了保证样本库的客观性和完整性,在确定布局分区的前提下,将色彩元素根据三大设计原则逐一进行填充,总结得出产品色彩样本库。主要有以下三个设计原则:

1) 色彩方案为双色配色原则。产品色彩主要由两种色彩组成,分别为有色色彩和无色色彩。

2) 主辅色判定原则。当产品中出现两种色彩时需要分清主次,通过色彩对比与面积的关系将产品色彩分为主色色彩和辅色色彩。运用孟赛尔公式:

$$\frac{H^A \times S}{H^B \times S} = \frac{X^B}{X^A} \quad (2)$$

式中, H^A ——A 色相的亮度; H^B ——B 色相的亮度; S——饱和度; X^B ——B 面积; X^A ——A 面积。

根据公式得出“小面积用强色,大面积用弱色”,即色彩方案中主色为无色色彩,辅色为有色色彩。

3) 观察窗不参与配色方案原则。观察窗的主要作用是观察机床工作情况，主要由无色透明玻璃制成，因此不做赋色处理。

2 基于 BP 神经网络的色彩设计评价模型构建

根据神经网络的相关结构与技术，构建色彩设计评价模型。首先将不同布局形式下的色彩样本运用调查问卷对样本进行量化，然后确定神经网络的网络结构，最后将量化数据输入神经网络进行运算，通过不断地运算调整，建立评价模型。

2.1 色彩设计方案的量化

由于产品的色彩设计方案评价是一个较为复杂的过程，因此本研究运用语义差分 (SD) 法，通过专家法评定权重值以及影响色彩方案评价的几个因素制作调查问卷，对设计方案进行量化。

2.2 确立 BP 神经网络结构

神经网络算法是模拟人脑形成的，具有较强的搜索与学习功能，运用神经网络建立评价模型可以较好地模拟用户的意象选择。其结构一般分为三部分：第一部分是输入层，第二部分是隐含层，第三部分是输出层。其基本预算规则是在输入层中将数值输入，通过隐含层的分析计算，得出结果由输出层进行输出。如果结果有误差，需要再将输出层的误差反向传播到输入层，通过不断调整网络的权值和阈值，将网络的误差平方和降到最低。通过设计 BP 神经网络的组成结构、选择激励函数和学习算法，建立以数控机床配色分区五个影响因素指标为输入、数控机床整体色彩主观评价值为输出的 BP 神经网络评价模型。

1) 神经网络的结构设计。由于本研究中配色分区元素与感性意象的映射关系相对来说较为简单，因此将隐含层设计为一层，输入层主要由配色分区的 5 个影响因素指标构成，因此输入层的神经元节点为 5 个，输出感性意象评价为一个感性形容词，因此输出层的神经元节点为 1 个，而隐含层的神经元节点由于其不可知性，因此用考虑隐含层节点数的经验公式来确定：

$$J = \sqrt{(N+M)} + \alpha, (\alpha = 1 \sim 10) \quad (3)$$

式中， J ——隐层节点数； N ——输入层节点数； M ——输出层节点数。

文中输入神经元节点数 $N = 5$ ，输出神经元节点数 $M = 1$ ，因此隐藏节点数 $J = 3 \sim 11$ 。经查阅文献研究发现隐藏神经元节点数小于 9 时，可能出现的误差比较大，故隐藏层神经元节点数的范围定为 9~11，对于隐含层节点数的这三种不同的情况分别使用 Matlab 进行其误差分析，最终确定隐含层节点数为 10，所以神经网络结构最终确立为输入层神经元

表 1 训练函数误差表
Tab.1 Training function error table

训练函数	成功次数	平均误差	平均训练时间
Trainbfg	45	2.5047715	2.00384
Trainlm	43	1.9446886	2.00224
Trainrp	40	1.9660869	2.00359
Trainscg	45	1.8837178	2.00226

节点数为 5，一层隐含层，神经元节点数为 10，输出层为 1 个神经元节点。

2) 激活函数的选择。BP 神经网络常用的主要有三种激活函数，分别是 S 型的对数函数、正切函数和线性函数。S 型函数具有非线性放大的特点，其区间是 $(-\infty, +\infty)$ ，由于 S 型的函数在同时进行大小数据的处理时具有较大的优势，因此选取 S 型函数作为激活函数。

3) 确定训练函数。训练函数是智能算法的集中体现，其选取的函数对最终网络的性能有着显著的影响，BP 神经网络常用的算法分为启发式学习方法和数值优化方法，由于本研究只涉及数值的优化部分，因此采用数值优化的方法，初步考虑这 4 种较为常用的方法 Trainbfg、Trainlm、Trainrp 和 Trainscg 函数作为训练函数分别进行训练，训练结果见表 1。

通过表中的平均误差和训练时间的数据对比后，最终选择 Trainscg 函数为本研究的训练函数。在实际运算时，通常采用正向传播，但是当输出结果的误差过大时，需要进行反向传播运算。

3 数控机床色彩设计实例

数控机床的产品构件较多，组合形式也很多，其产生的布局形式也非常多样，如果过早地将布局形式定义下来，可能只找出这个布局形势下最优解，所以本研究以数控机床为例寻找不同布局形式下优秀色彩设计方案，使色彩设计方案更加全面。

3.1 建立数控机床色彩样本库

3.1.1 数控机床样本分析

通过网络搜索和网站门店检索共计得出数控机床初始样本图片 180 个，首先对数控机床的结构进行分解，以样本图片结构的正视图为例进行数据量化，得出床身，床门，观察窗，底座和操作面板五大类参数，通过选取分类参数将样本图片进行量化。将量化参数输入 SPSS 软件中进行聚类分析，得出数控机床的代表性样本图片，以产品样本主视图为主，在 PHOTOSHOP 软件中将代表性样本进行统一化（见图 1）和轮廓化处理，得出数控机床的线描图形（见图 2）。



图1 统一化
Fig.1 Unification

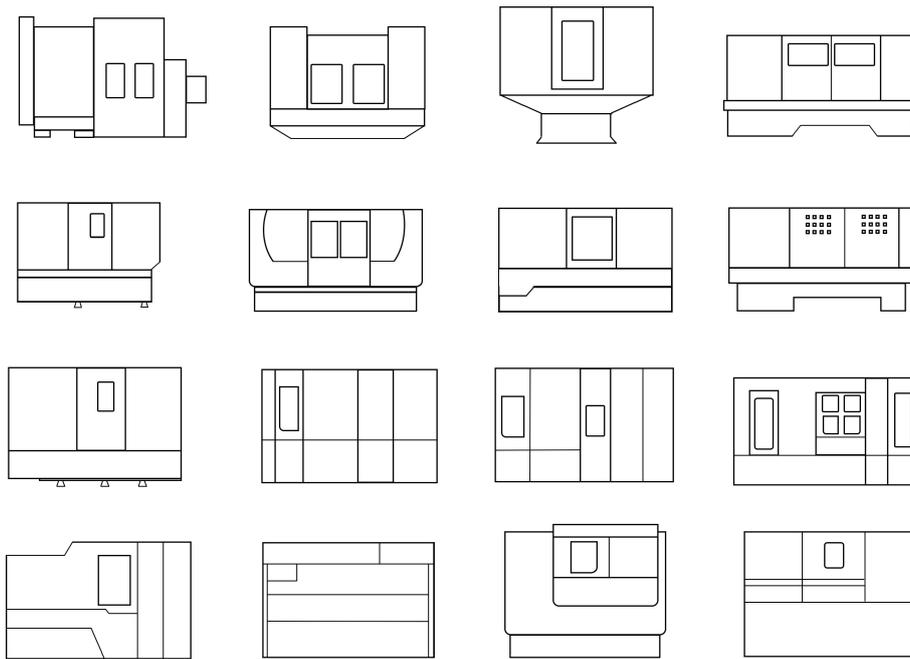


图2 轮廓化
Fig.2 Outline

3.1.2 生成布局形式样本

将上述的数控机床样本运用象元理论进行成分提取,通过分析、总结以及进一步地提炼,将其主要成分提取为四大类骨象元,第一类骨-面象元 Ma,第二类骨-面象元 Mb,第三类骨-面象元 Mc,第四类骨-面象元 Md。得出其图形符号见图3。

骨-面象元是“对立互补”的关系,表达数控机床的基本形式结构特征的象元称为数控机床骨象元,用以表达数控机床组成部分的面积大小特征的象元

称为数控机床面象元。一般情况下,不同造型的数控机床具有不同的骨象元和面象元。每一种骨象元又对应多个面象元,主要调节组合过程中的面积比例大小,见图4。以李克特量表法为例,将所对应的面象元比例变化总结为7个维度用以代表常用的面积比例。

即一个骨象元有7个维度的面象元用以满足象元相关的运算法则,生成形态各异的合成象元。运用已得出的四大类骨-面象元依此合并生成新的合成象

元具有完整性和客观性。数控机床象元合并运算的运算法则定义为：

$$M_{ax-k} + M_{ax-k} + M_{ax-k} + M_{ax-k} = M_e \quad (4)$$

其中，象元 M_{ax-k} 属于{第一类赋色骨-面象元床身}，象元 M_{bx-k} 属于{第二类赋色骨-面象元床门}，象元 M_{cx-k} 属于{第三类赋色骨-面象元观察窗}，象元

M_{dx-k} 属于{第四类赋色骨-面象元底座}。合并轮廓样本 Me 属于{新的合成象元}。

四大类骨象元合并运算结果的示例见图 5。

象元的合并运算可以实现更加繁杂多样的布局分区变化要求，为设计师提供更多的思路 and 方案，更加客观的将提出不同的色彩布局形式。本研究通过象

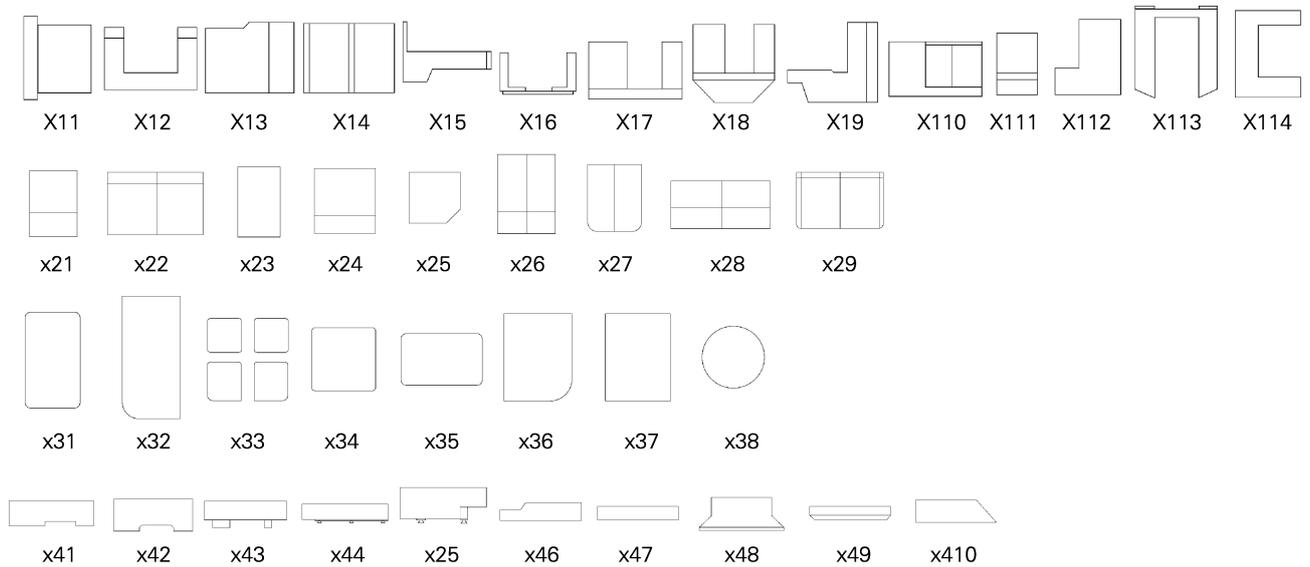


图 3 骨象元符号
Fig.3 Bone Meta Symbol

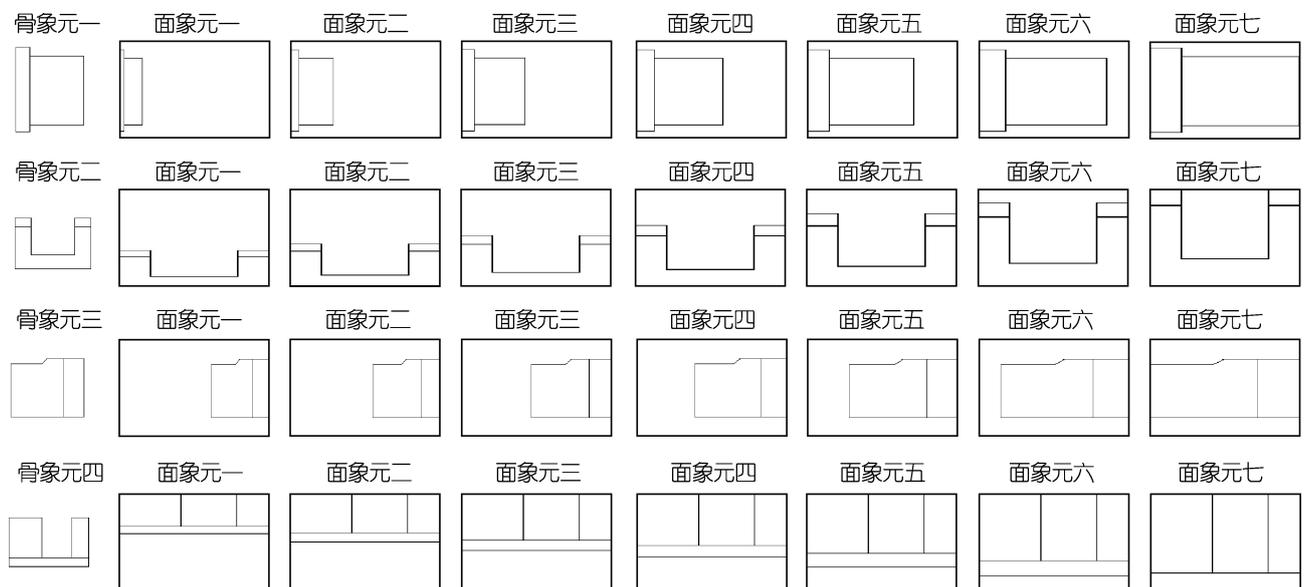


图 4 面象元七个维度
Fig.4 Bone and area meta symbol

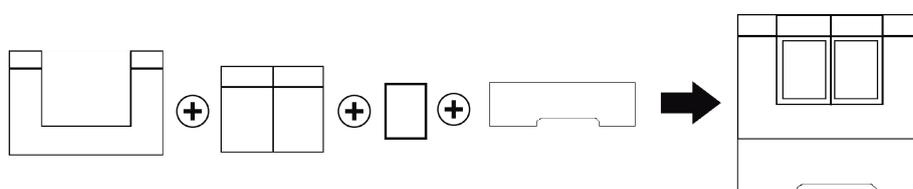


图 5 合并示例
Fig.5 Merge example

元合并法则得出新的合成象元为 $13 \times 9 \times 10 \times 8 = 9360$ 个,通过主成分分析法和专家讨论法去除相似的、不合理的布局分区样本,最终得出40个代表性布局分区样本用于本实例研究,见图6。

3.1.3 构建色彩元素库

首先对初步总结的样本图片进行案例分析,将每个样本图片提取的色彩值分为一组进行分析和总结,得出数控机床的双色配色分区的色彩规律,即:无色色彩+有色色彩。将收集到的色彩样本按照其色彩占数控机床主视图的总面积大小进行排列,提取其占比最大的两种色彩,制作色彩样本集,其中排名第一的色彩定义为该数控机床的主色彩,排名第二的色彩定义为该机床的辅色彩,见图7。通过PHOTOSHOP软件中的拾色器工具提取色彩进行数据量化,统计分析。

通过对色彩样本的分析后发现:数控机床色彩设计方案过于雷同。为了丰富数控机床的色彩分区设计方案,因此构建了两组色彩元素库,一个是无色色彩,一个是有色色彩,以上文提出的设计原则为基础进行产品色彩的设计,可以扩展设计思路,在实际操作中可以选择优秀方案辅助设计。

第一部分是无色色彩元素库,主要分为黑白灰三种类型。本研究中运用均值计算来构建无色色彩元素

库S1,主要方式是在PS的拾色器中提取色彩的饱和度S、亮度V和色相H的数值,进行均值计算,得出白(3, 86, 166),灰(12, 20, 181),黑(9, 54, 149)为无色色彩元素库。

第二部分为有色色彩的元素库的构建,由于数控机床的有色色彩分布较为单一,且饱和度S和亮度V的值的相似性较高,因此通过色相H的变化来构建有色色彩库S2。首先在PS中将样本进行量化统计,并计算饱和度S和亮度V的均值得出:饱和度 $S=70$,亮度 $V=67$ 。设色相为自变量H,在色环上每隔 30° 进行色相抽取,最终得出12组色相值。将色相与饱和度和亮度分别输入PS处理之后,得出初选色彩元素库。由于数控机床属于特殊工业产品,考虑到安全性及行业特色,对于其色彩的采用要十分慎重,因此对上述色彩进行再一分析,最终得出以下9种色彩元素,见图8。

3.1.4 构建色彩样本库

在构建色彩样本库时,上述提出三种设计原则为设计依据,以色彩元素库为设计内容对上述40个布局分区样本进行赋色处理,得出数控机床的样本库共计 $40 \times 3 \times 8 \times 3 = 2880$ 个,建立电子样本图册,见图9。通过专家讨论法,结合数控机床产品的实际操作需求,最终选出200个设计方案作为调查样本。

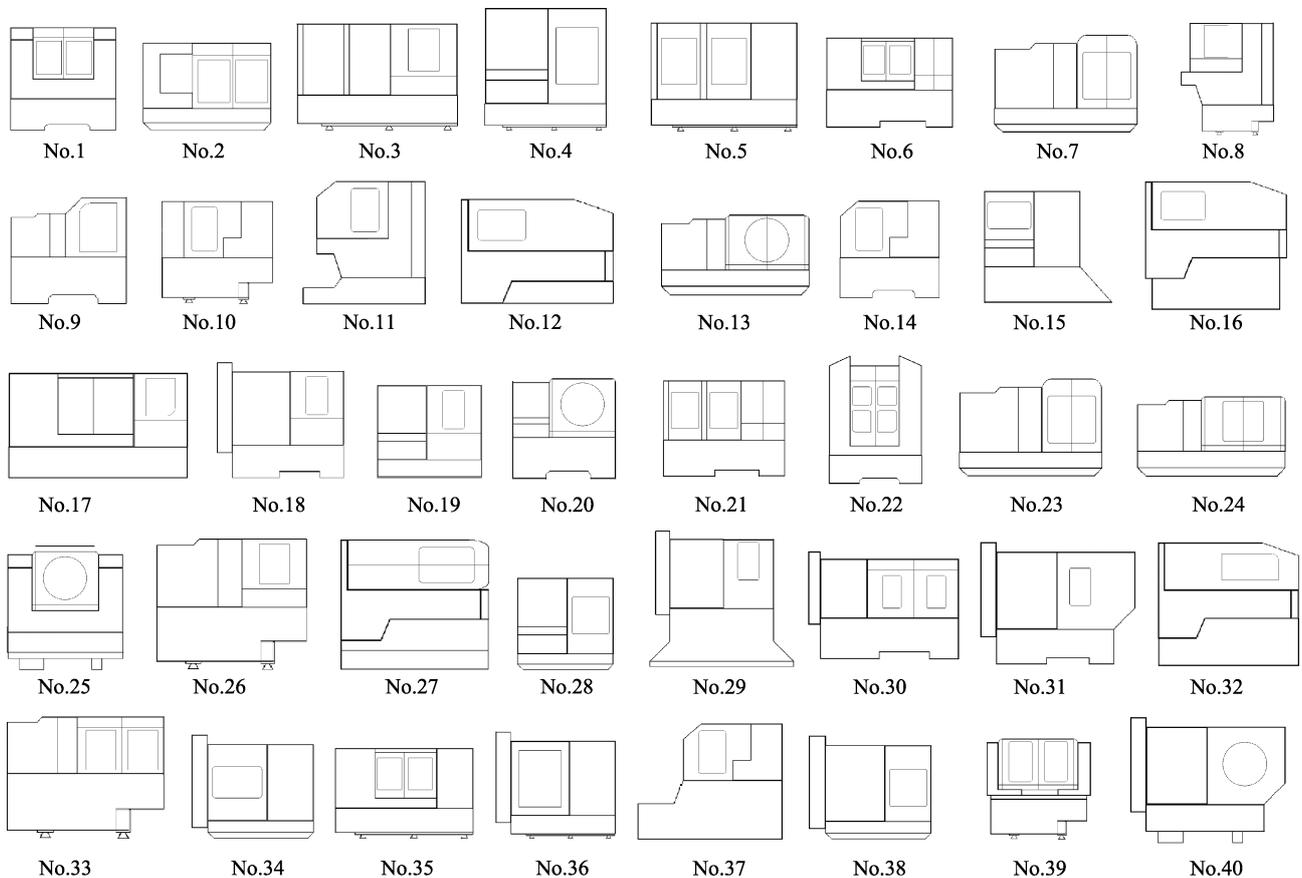


图6 布局分区样本
Fig.6 Layout partition sample

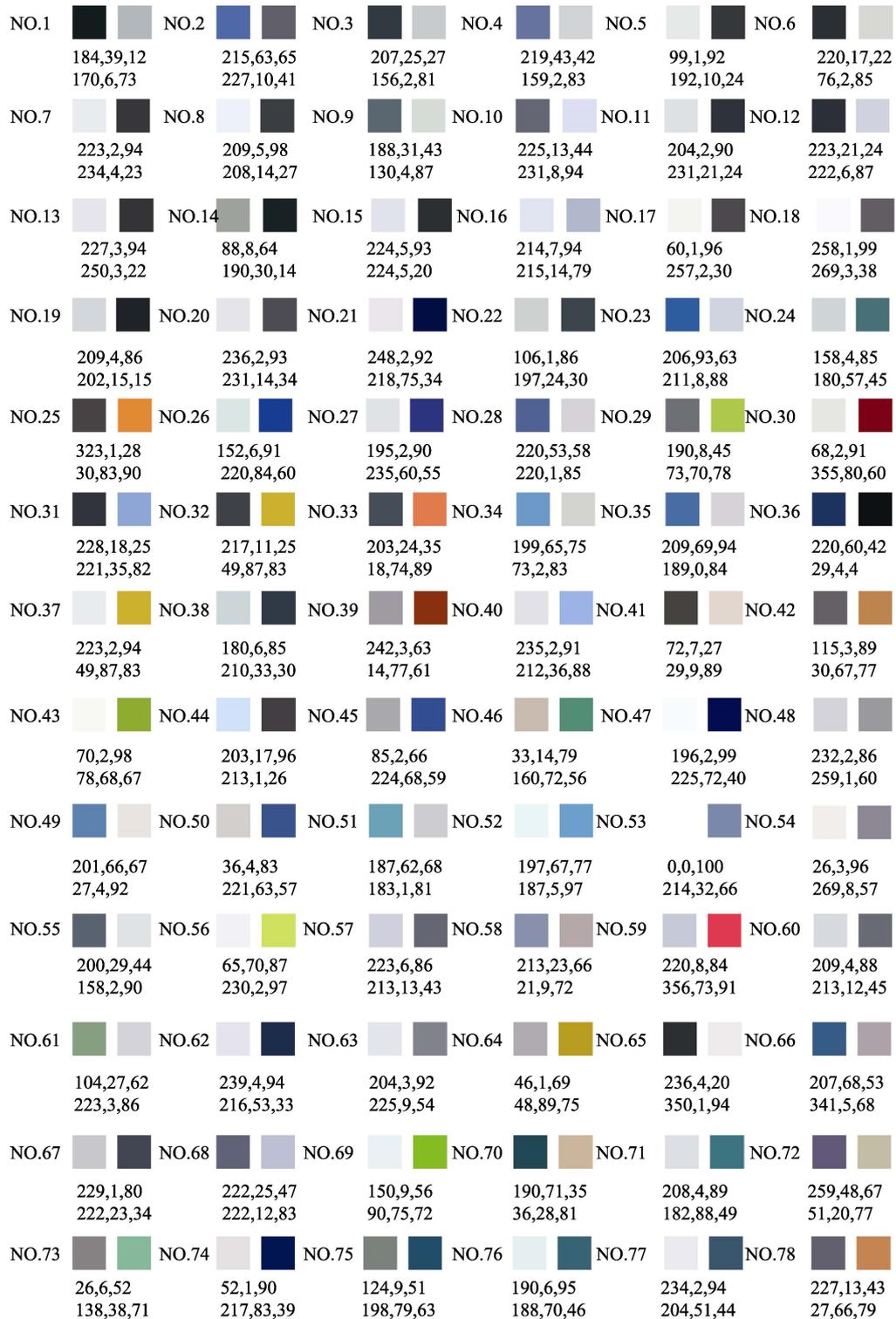


图 7 色彩样本提取

Fig.7 Color sample extraction

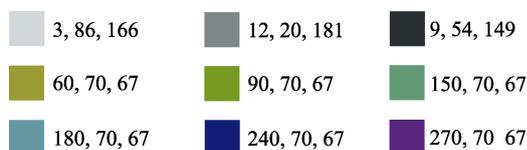


图 8 色彩元素库

Fig.8 Color element library

3.2 建立色彩设计评价模型

使用 BP 神经网络辅助数控机床的色彩方案设计,通过设计网络的结构、选择激励函数和学习算法,提取数控机床色彩方案与评价得分之间的映射关系,建立以数控机床五大元素为输入、数控机床整体色彩主观评价值为输出的 BP 神经网络评价模型。

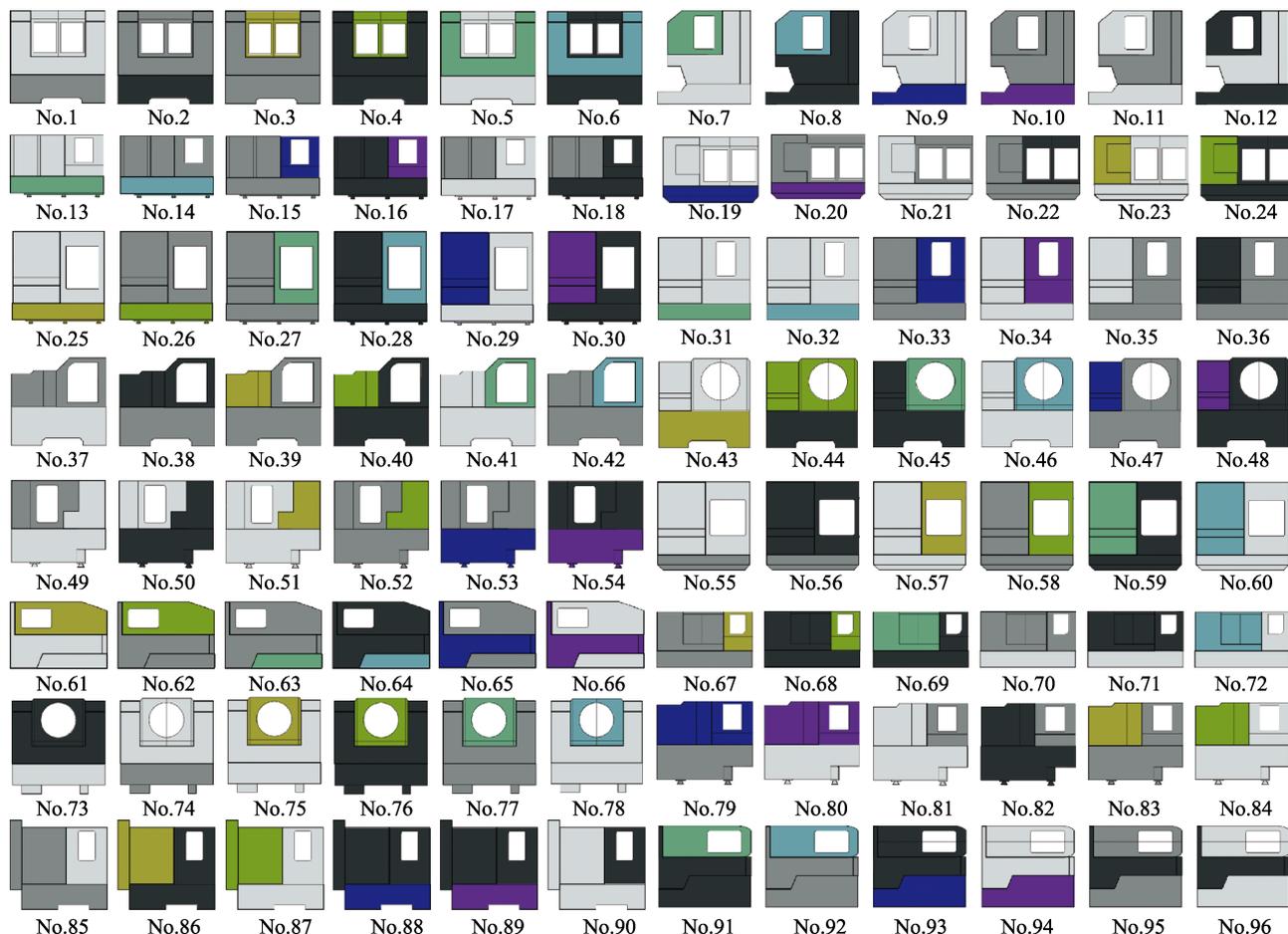


图9 电子样本图册(部分)
Fig.9 Electronic sample atlas (partial)

表2 部分色彩样本数据
Tab.2 Partial color sample data

样本编号	样本图片	赋色骨-面象元	评价得分
1		$M_{a11-2}^{s2_5} + M_{b9-3}^{s2_5} + M_{c8-3} + M_{d2-4}^{s1_4}$	4.11
2		$M_{a11-2}^{s1_3} + M_{b9-3}^{s2_6} + M_{c8-3} + M_{d2-4}^{s1_4}$	4.23
3		$M_{a11-2}^{s1_1} + M_{b9-3}^{s2_7} + M_{c8-3} + M_{d2-4}^{s1_4}$	4.52
4		$M_{a11-2}^{s2_8} + M_{b9-3}^{s1_2} + M_{c8-3} + M_{d2-4}^{s1_4}$	3.98
5		$M_{a11-2}^{s2_9} + M_{b9-3}^{s1_3} + M_{c8-3} + M_{d2-4}^{s1_4}$	4.03
⋮	⋮	⋮	⋮
200		$M_{a3-3}^{S12}, M_{b5-4}^{S12}, M_{c6-5}, M_{d2-5}^{S11}$	4.23

表3 训练函数数据
Tab.3 Training function data

激活函数	成功次数	平均误差	平均训练时间
Tan-sigmoid	17	0.024646	0.074130995
Log-sigmoid	15	0.025373	0.074597385

3.2.1 数控机床设计方案量化

以上文提出的 200 个色彩方案为主要内容制作调查问卷进行打分评价,选取的问卷调查对象一组是 5 个有数控机床工作经验的操作者,另一组是 10 个产品专业的设计师及研究生。部分测试样本图片及合成象元 M 的评分数据见表 2。

通过调查问卷统计样本库内的产品方案得分,将其量化数据输入神经网络,得出不同样本与评价得分之间的映射关系。

3.2.2 确立 BP 神经网络结构

BP 神经网络有正向传播和反向传播两种方式,因此激活函数的选择十分重要。在 S 型函数中较常用的有正切函数和对数函数,分别选取这两个函数作为第一层的传递函数,进行 20 次训练并统计其数据,见表 3。

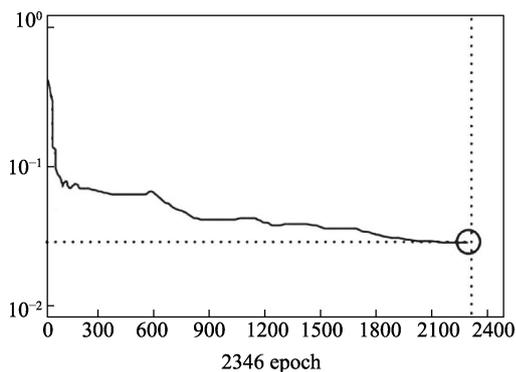


图 10 函数收敛图

Fig.10 Function convergence graph

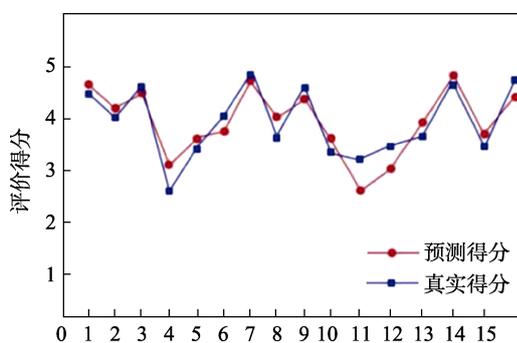


图 11 预测样本

Fig.11 Prediction sample

由表中的训练 20 次的的数据可以看出，两种函数都可以满足网络需求，经比较得出 Tan-sigmoid 函数的平均误差和训练时间均低于 Log-sigmoid 函数，因此本研究的第一层传输函数采用 Tan-sigmoid 函数，其表达式为：

$$y = \frac{2}{1 - e^{-2x}} - 1 \quad (5)$$

由于其函数可以将 $(-\infty, +\infty)$ 映射到 $(-1, +1)$ 的区间上，而本研究的输出数据并不限制在此区间，因此要对数据进行反归一化处理，故第二层传递函数选用 purelin 函数。其表达式为：

$$y = x \quad (6)$$

综上所述，BP 神经网络的结构为一个输入层，一个隐含层和一个输出层，其中输入层的神经元节点数为 5，隐含层的神经元节点数为 10，输出层的神经元节点数为 1。在该网络中，第一层传递函数为 Tan-sigmoid 函数，第二层传递函数为 purelin 函数，Trainscg 函数为本研究的训练函数。

3.3 训练神经网络及模型验证

用 SD 调查问卷的统计结果作为训练样本，共有 200 个训练样本，感性意象是相对应的 200 个期望输出评分。训练时，取前 185 个样本作为训练样本，余下的 15 个样本作为测试样本。设置网络的学习次数为 5 000，设置误差目标值为 0.001，采用 trainged(梯

度下降)法，利用 MSE 衡量训练结果，网络在 2 346 次训练时达到训练目标，停止训练。其得到的训练结果见图 10。

将剩余 15 个样本导入神经网络进行预测其设计方案样本对应的总体评价价值。将预测的输出值与问卷调查的数据做对比，发现两者基本吻合，见图 11，其中蓝线是问卷得分，红线是预测得分，可以清楚地看到预测结果非常符合用户的意象水平变化，说明神经网络建立了色彩布局设计总体评价价值的正确映射。

4 结语

本研究以数控机床为主要研究对象，运用象元理论对色彩布局进行元素分解，然后通过象元合并运算得出产品的不同布局形式方案，研究不同布局形式的色彩设计对产品意象的影响，从产品形态特征、象元元素分解与运算、不同布局形式以及数控机床的主要配色色彩等方面进行了系统的研究，与以往单线研究寻求最优解的立足点不同，在立足于多线研究寻找平行方案上具有较强的参考价值。该方法也可以适用于其他产品的色彩布局研究中，但是也面临着前期分析和学习样本的复杂性问题，因此在进一步的深入研究时可以进行必要的简化。

参考文献：

- [1] 高秀慧, 杨庆东. 基于层次分析法的数控机床设计评价[J]. 北京信息科技大学学报(自然科学版), 2018, 33(2): 45-48.
GAO Xiu-hui, YANG Qing-dong. Evaluation of CNC Machine Tool Design Based on AHP[J]. Journal of Beijing University of Information Technology (Natural Science Edition), 2018, 33(2): 45-48.
- [2] 吴永祥. 机械产品外观色彩的选择[J]. 现代制造工程, 2006(10): 129-130.
WU Yong-xiang. Selection of Appearance Color of Mechanical Products[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2006 (10): 129-130.
- [3] 于双义, 李雨桥, 李宁. 环卫车辆产品的外观色彩设计与分析[J]. 汽车实用技术, 2019(15): 136-137.
YU Shuang-yi, LI Yu-qiao, LI Ning. Exterior Color Design and Analysis of Sanitation Vehicle Products[J]. Automotive Practical Technology, 2019(15): 136-137.
- [4] LI Y, YIN H, HUI C X, et al. The Application of Color Symbol to Product Design[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013(319): 278-281.
- [5] OU L, LUO M R, SUN P, et al. A Cross-Cultural Comparison of Colour Emotion for Two-Colour Combinations[J]. Color Research & Application, 2012, 37(1): 23-43.
- [6] 赵晖. 基于意象表征的智能色彩设计方法研究及其应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.

- ZHAO Hui. Research and Application of Intelligent Color Design Method Based on Image Representation[D]. Nanchang: Nanchang University, 2013.
- [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] WEN S H, 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.
- [9] TSAI, HUNG. Computer Aided Product Color Design with Artificial Intelligence[J]. Computer-Aided Design and Applications, 2007, 4(1-4): 557-564.
- [10] ZTEKIN A O, ISERI A ZAIM S, et al. A Taguchi-Based Kansei Engineering Study of Mobile Phones at Product Design Stage[J]. Production Planning & Control, 2013, 24(6): 465-474.
- [11] SUN Xing-wei WANG Jun, FENG Xin, et al. Structure Analysis and Optimum Design of NC Grinding Machine Tool Bed[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011(1376): 909-912.
- [12] DING M, BAI Zhong-hang. Product Color Emotional Design Adaptive to Product Shape Feature Variation[J]. Color Research & Application, 2019, 44(5): 811-823.
- [13] DING M, DONG W. Product Color Emotional Design Considering Color Layout[J]. Color Research & Application, 2019, 44(2): 285-295.
- [14] 吕娜. 基于认知心理的家电双色配色研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2016.
LU Na. Research on Two Color Color Matching of Household Appliances Based on Cognitive Psychology[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2016.
- [15] 张全. 产品色彩智能设计理论与方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
ZHANG Quan. Research on Theory and Method of Product Color Intelligent Design[D]. Xi'an: Northwest University of Technology, 2007.
- [16] 冯青, 吴梦迪, 余隋怀, 等. 基于 BP 神经网络的罐式车辆配色与评价方法研究[J]. 机械设计, 2019, 36(1): 118-123.
FENG Qing, WU Meng-di, YU Sui-huai, et al. Research on Color Matching and Evaluation Method of Tank Vehicles Based on BP Neural Network[J]. Mechanical Design, 2019, 36(1): 118-123.
- [17] 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(20): 99-105.
LIU Zheng-hong, YAN Ji-duo, LIN Yun, et al. Product Color Matching Design Method Based on Perceptual Engineering and Interactive Genetics[J]. Packaging Engineering, 2019(20): 99-105.
- [18] 薛磊, 易晓. 高速列车座椅意象造型与色彩设计研究[J]. 机械设计, 2019(3): 143-148.
XUE Lei; YI Xiao. Research on Image Modeling and Color Design of High-Speed Train Seats[J]. Mechanical Design, 2019(3): 143-148.
- [19] 苏建宁, 范跃飞, 张书涛, 等. 基于感性工学和神经网络的产品造型设计[J]. 兰州理工大学学报, 2011(4): 47-50.
SU Jian-ning, FAN Yue-fei, ZHANG Shu-tao, et al. Product Modeling Design Based on Perceptual Engineering and Neural Network[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2011(4): 47-50.
- [20] ANTONIO L, PIETRO T. Kansei Engineering Approach for Total Quality Design and Continuous Innovation[J]. The TQM Journal, 2008(20): 324-337.
- [21] MING-Chuan chiu, KONG-Zhao lin. Utilizing Text Mining and Kansei Engineering to Support Data-Driven Design Automation at Conceptual Design Stage[J]. Advanced Engineering Informatics, 2018(38): 826-839.
- [22] 吴俭涛, 袁放, 孙利. 基于象元运算的轮毂形态设计方法研究[J]. 包装工程, 2018, 39(24): 163-171.
WU Jian-tao, YUAN Fang, SUN Li. Research on Hub Shape Design Method Based on Image Element Calculation[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(24): 163-171.
- [23] 吴俭涛. 基于象元的形态设计方法及其应用研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
WU Jian-tao. Morphological Design Method Based on Image Element and Its Application Research[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.