【视觉传达设计】

基于 PCCS 色彩体系和灰色关联分析的产品色彩设计方法

陈天宇[1]，肖旺群[1,2]
（1.安徽工业大学 艺术与设计学院，安徽 马鞍山 243032；
2.安徽省智能破拆装备工程实验室，安徽 马鞍山 243002）

摘要：目的 旨在帮助设计人员把握产品色彩属性与用户意象感知间潜在联系，提高产品色彩设计效率。**方法** 采用多维统计及聚类分析获取 PCCS 色彩体系下的代表性色彩样本与语汇样本，并设置色彩语义量化实验获取色彩在各语汇尺度上的意象评值。以获取的评值量化数据为基础结合灰色关联分析，通过色彩转置在 Lab 均匀色彩空间中建立产品的色彩设计评价模型。**结果** 以双色儿童玩具车为对象进行产品色彩设计实践，构建的色彩设计评价模型良好达成了产品色彩方案的用色筛选、确认及评价优选等目标。**结论** 结合灰色关联分析，在 PCCS 色彩体系下构建的产品色彩设计评价模型能够有效提升产品方案的色彩设计效率，并对产品色彩方案的优选给出直观准确的参考标准。

关键词：PCCS 色彩体系；灰色关联分析；意象感知；Lab 色彩空间；色彩设计
中图分类号：TB472 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2023)22-0259-08
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.22.029

Product Color Design Method Based on PCCS Color System and Grey Relational Analysis

CHEN Tian-yu[1], *XIAO Wang-qun*[1,2]
(1.School of Art and Design, Anhui University of Technology, Anhui Ma'anshan 243032, China;
2.Anhui Province Engineering Laboratory of Intelligent Demolition Equipment, Anhui Ma'anshan 243002, China)

ABSTRACT: The work aims to help designers grasp the potential connection between product color attributes and user image perception, and improve the efficiency of product color design. Multi-dimensional statistics and cluster analysis were used to obtain representative color samples and vocabulary samples under the PCCS color system, and color semantic quantification experiments were set up to obtain image ratings of color on various vocabulary scales. Based on the obtained evaluation value quantitative data combined with grey relational analysis, the color design evaluation model of the product was established in the Lab uniform color space through color transposition. Taking the two-color children's toy car as the object for product color design practice, the constructed color design evaluation model achieved the objectives of color screening, confirmation, evaluation and optimization of product color schemes. Combined with grey relational analysis, the product color design evaluation model constructed under the PCCS color system can effectively improve the color design efficiency of the product scheme, and provide an intuitive and accurate reference standard for the optimization of the product color scheme.

KEY WORDS: PCCS color system; grey relational analysis; image perception; Lab color space; color design

色彩作为产品外显属性之一，会影响用户对产品的情感认知，进而影响用户在购买和使用阶段的行为决策[1]。而随着用户对感性消费和自我体验认知的快速发展，基于情感的产品色彩设计受到前所未有的关注[2]。产品色彩设计成为设计师确定产品色彩属性与用户意象感知之间映射关系，为产品赋予恰当色彩以

收稿日期：2023-06-14
基金项目：教育部人文社科青年基金项目（18YJCZH197）；安徽省智能破拆装备工程实验室开放基金项目（APELIDE2021B007）；安徽省高等学校科研计划重大项目（2022AH040051）；安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目（gxyqZD2018029）

获取商业成功和优质用户体验的有力工具。如何确定这种潜在的情感联系，构建基于用户情感认知的色彩设计模型也成为学界的研究热点，目前国内外学者运用神经网络[3-5]、灰色理论[6]、感性工学[7]等多种理论方法及眼动、脑电等内隐测量手段[8-10]对用户与色彩情感认知间关系展开研究，极大扩充了产品色彩设计的方法库，也为新方法的创建确立提供了参考。

PCCS（Practical Color Co-ordinate System）色彩体系由日本色彩研究所创立研发，经过多年的应用实践以其直观快捷的配色方法在色彩教育、时尚形象设计、色彩设计等领域独具优势[11]，因而也被学者广泛运用于学术研究中。例如，刘珈俐等[12]比较 PCCS 色彩体系与其他 4 种常见色彩体系的适用性特点，并用其分析傣锦的色彩属性和设色规律，指导傣锦的色彩设计。高帅等[13]结合 PCCS 色彩体系，针对老年人医疗 APP 用户界面构建配色评价体系。董可然等[14]基于 PCCS 色彩体系剖析爱马仕品牌针对日本消费者色彩审美偏好所进行的橱窗色彩设计，研究其色彩品牌战略的建构模式。陈伟伟等[15]在 PCCS 色彩空间中提取不同服装风格的色彩进行量化统计，获得两者之间的空间对应关系，为服装的风格和色彩设计提供帮助。金冬等[16]以 PCCS 表色系统为基准，结合有关公司的经典设计案例，构建橱柜在色彩设计层面新的策略方法。Jin 等[17]根据 PCCS 色彩体系结合眼动实验，从视觉器官的色彩感知和客观视觉思维两个层面提出了针对移动终端 UI 的色彩设计方法。Hsiao 等[18]对 PCCS 色彩体系的颜色样本根据审美测度理论计算三色和谐的审美测度，研究出一种通过预测色彩趋势获得三色组合的方法。

以上研究表明 PCCS 色彩体系能够帮助设计师搭建色彩设计平台，但无法直接构建色彩与各意象尺度间的量化关系，为产品的色彩设计过程提供准确明晰的数值参考，且现有研究多利用 PCCS 色彩体系进行色彩的提取与分析，基于 PCCS 色彩体系进行色彩意象语义量化方面的研究较少。本文以 PCCS 色彩体系的理念方法为基础，通过聚类筛选出色彩及语汇样本进而设置色彩的意象语义量化实验，结合灰色关联分析快速获取色彩在各语汇尺度下的直观意象评值，为产品色彩设计提供一种新的可选思路和方法。

1 PCCS 色彩意象语义量化

实现色彩的意象语义量化需要分别获取 PCCS 色彩体系下代表性的色彩及语汇样本，并以此为实验素材设置色彩意象语义量化实验，其整体流程见图 1 所示。

1.1 PCCS 色彩样本获取

在 PCCS 色彩体系中，色彩的色值由色相、明度、纯度三者构成，为了进行色彩样本的筛选及后续的灰

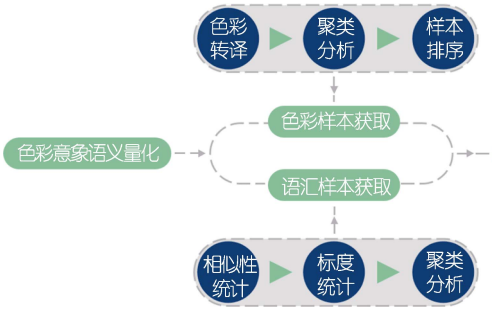


图 1 色彩意象语义量化流程

Fig.1 Semantic quantification process of color image

色关联度计算，需要将色值与常用色彩模式中的 *R*、*G*、*B* 值相匹配。将 PCCS 色彩与 RGB、CMYK 对照表中的 201 个色彩作为基础样本，以色彩的编号、色相值、明度值、纯度值、*R*、*G*、*B*、*C*、*M*、*Y*、*K* 共 11 项为变量进行聚类，通过四次迭代聚类后共获得 25 个具有代表性的色彩样本，其色彩编号及 *R*、*G*、*B* 值如表 1 所示。

表 1 色彩样本编号及 RGB 值

Tab.1 Color sample number and RGB value

色彩编号	*R*	*G*	*B*	色彩编号	*R*	*G*	*B*
v2	205	31	66	sf24	174	111	133
v11	74	163	21	d4	169	99	76
v12	0	154	85	dk10	83	86	23
v21	102	62	140	dk18	20	52	78
v23	137	44	113	dk22	66	41	68
b5	251	141	61	p12	189	217	201
b6	251	165	47	ltg20	156	153	169
b20	113	107	182	g8	113	105	81
dp8	164	143	0	Gy8.5	210	210	210
dp16	0	82	111	Gy7.5	182	182	182
lt16+	82	166	191	Gy6.5	129	129	129
lt24	217	149	172	Gy3.5	82	82	82
sf6	213	159	98				

1.2 PCCS 语汇样本获取

PCCS 色彩体系将色彩三属性中的明度和纯度混合引申出色调的概念构建 PCCS 色调图，并根据不同色调给人的不同心理感受将语汇分置在 15 个色调中，如将“生动、夺目、显眼”等语汇放置在色彩鲜艳、饱和度高的原色调（v）中，而将“沉稳、商务、成熟”等语汇放置在明度较低的暗色调（dk）中。PCCS 色调图建立在人们认知习惯的基础上，更为贴合用户的心理特质及设计者的思维逻辑，因此具备在色彩设计过程中使理性感性充分结合的优势。从 PCCS 色调图 v、b、s、dp、lt、sf、d、dk、p、ltg、g、dkg、W、Gy、Bk15 个色调中共选取 60 个语汇（见图 2）及分别描述 PCCS 色彩体系 6 个基本色红、橙、

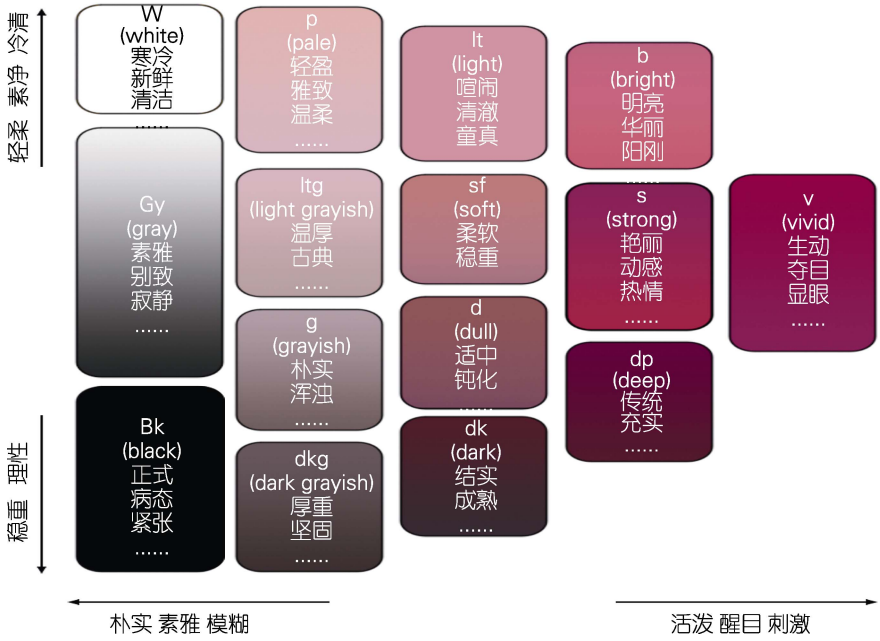


图 2　PCCS 色调图

Fig.2 PCCS tone map

黄、绿、蓝、紫的 3 个语汇合计 78 个语汇作为基础样本。

通过调查问卷的形式，要求被试者根据个人的实际感受对基础样本中的 78 个语汇进行相似性分群，将意象相近的语汇分入同一组中。本次调查共邀请 79 位被试者，回收有效问卷 74 份，被试者中有 68 人具有设计学习背景或设计实践经验，能够较为专业地进行语汇分群实验以确保最终数据具有参考性。统计每两个语汇出现在同一组中的次数，构建 78×78 的相似性矩阵，并导入 SPSS 软件进行 *K* 均值快速聚类。通过聚类，78 个语汇样本被置入 5 个聚类组群中，最终聚类结果见表 2。对相似性矩阵中的数据采用多维标度统计，迭代四次后得到碎石图（见图 3）及 8 个维度各自的空间坐标，以空间坐标为数据样本进行 *K* 均值快速聚类得到 8 个维度空间内各聚类组群的中心坐标（见表 3）。

表 2　语汇样本聚类结果

Tab.2 Vocabulary sample clustering results

聚类组群	语汇样本
1	生机 华丽 活泼 动感 热情 艳丽 生动 显眼 新鲜 别致 现代 刺激 喧闹 动态 神秘 自信 张扬 兴奋 欢快 光辉 夺目 希望 豁达
2	忧郁 浑浊 寒冷 孤独 病态 紧张 模糊 钝化 阴暗 消极 寂静
3	童真 舒畅 甜美 浪漫 轻松 梦幻 单纯 明快 轻盈
4	温柔 素雅 平静 安定 朴实 清澈 浑厚 平和 质朴 雅致 柔软 清洁 含蓄
5	古典 沉稳 结实 可靠 品味 成熟 高级 商务 传统 正式 庄严 理性 镇定 适中 保守 厚重 大众 力量 阳刚 坚固 稳重

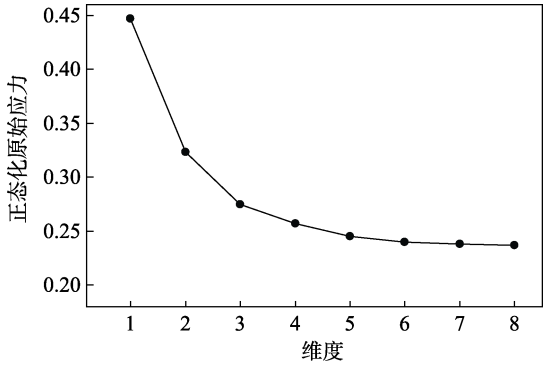


图 3　碎石图

Fig.3 Gravel diagram

表 3　8 个维度空间聚类中心坐标

Tab.3 Cluster center coordinates of eight dimensional space

维度空间	聚类组群 1	聚类组群 2	聚类组群 3	聚类组群 4	聚类组群 5
DIM_1	–0.045	–0.214	0.164	0.064	0.142
DIM_2	0.170	–0.077	0.009	–0.130	0.158
DIM_3	0.222	–0.119	0.056	0.039	–0.174
DIM_4	–0.018	–0.018	–0.113	0.018	0.169
DIM_5	–0.085	0.055	0.029	0.052	–0.132
DIM_6	–0.045	–0.060	–0.115	0.239	–0.100
DIM_7	–0.150	0.000	0.238	–0.043	–0.052
DIM_8	0.127	0.009	0.049	–0.022	–0.192

通过对碎石图曲线的观察，可以发现曲线在 5 维后坡度趋近平缓，因此取 5 维空间坐标对语汇样本的空间位置进行分析，计算各聚类成员即语汇样本与对应聚类组群中心的距离，距离越小代表性越高，从而获得各个聚类组群中的代表性语汇样本。聚类组群 1 中各语汇样本与聚类中心的距离如图 4 所示。同理绘

制其余 4 个聚类组群语汇样本与聚类中心的关系图例，并从每个聚类组群中选取距离顺位前 3 的语汇作为该聚类组群的代表性样本，参与后续的色彩语义量化实验。最终从 5 个聚类组群中获取的代表性语汇样本词组分别为新鲜、希望、生动；寒冷、紧张、模糊；甜美、轻松、单纯；平静、温厚、雅致以及可靠、镇定、正式。

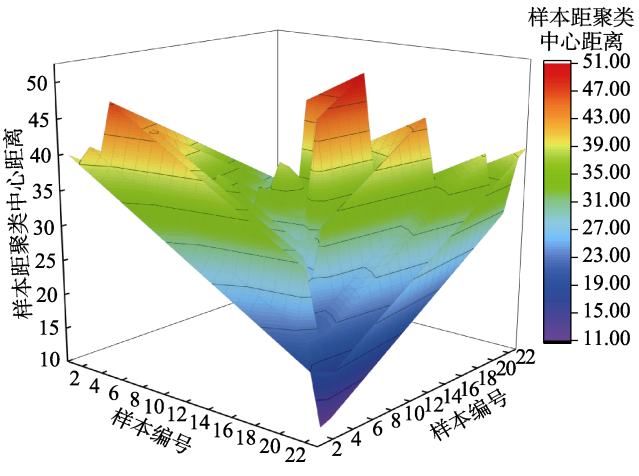


图 4 语汇样本与聚类中心间距离

Fig.4 Distance between vocabulary samples and cluster center

1.3 PCCS 色彩语义量化实验

以聚类获取的 25 个代表性色彩样本及 5 组由代表性语汇样本构成的词组，为实验素材设计 PCCS 色彩语义量化实验。实验采用语义分析法，要求被试者在观察色彩样本后根据自身的实际感受以 5 组词组为标准依次打分，分值标度分为 1~5 个层级，1 分为最不符合，5 分为最符合，符合程度随数值增大而攀升。在进行色彩样本排序时，打乱同色系、同明度的色彩样本顺序，避免相近色彩在实验时对被试者产生干扰。实验共邀请 53 位被试者参与，实验结束后，将 25 个代表性色彩样本在不同语汇尺度下的得分分别统计汇总，并求取均值作为该色彩样本在对应语汇尺度下的意象评值，以此绘制色彩、语汇、评值三者之间的对应图例，其结果见图 5。

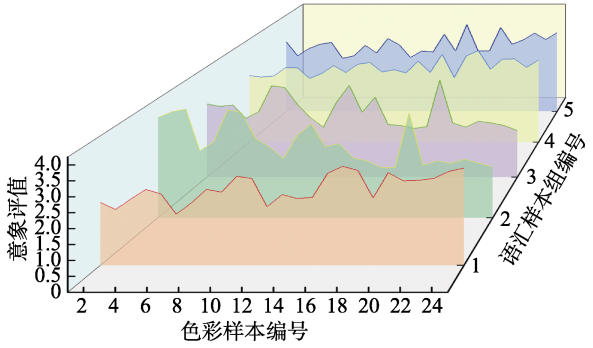


图 5 色彩样本意象评值

Fig.5 Image ratings of color samples

2 基于灰色关联分析的色彩设计评价模型

2.1 灰色关联分析

在现实生活中，同一种色彩可以应用多个感性语汇进行描述，评价主体的不同也对色彩的描述结果造成差异，此外色彩的色相、明度、纯度三属性分别作用于主体的意象感知，最终导致对色彩的意象表述具有极强的主观性和模糊性，需要引入合适的量化方法确保色彩意象评值的准确性。灰色关联分析通过判断因素之间发展趋势的相似程度来衡量因素的关联性，在设计领域，灰色关联分析常被应用于设计指标的数值运算，以实现设计元素和方案的优选与评价。宫琳等[19]采用灰色关联分析确定产品之间相似程度，并以此参与构建产品的概念设计方法；Wang 等[20]以口红为例，运用灰色关联分析建立产品感知设计中建模元素的优先级评价机制。Wang 等[21]以黄金珠宝为设计研究对象结合灰色关联分析解决饰品品类的设计意义创新。Wei[22]基于灰色关联分析，针对公共空间引导标志的建模设计和色彩设计提出了一种新的研究手段和数值计算方法。同时，灰色关联法也常与层次分析法联用以构建产品方案的设计评价研究模型[23-25]。而张琳等[26]以 RGB 色值进行灰色关联分析，成功将色彩的主观模糊表达转换为具体的色彩意象评值，验证了以单一色彩模式色值进行灰色关联从而获取色彩意象感知结果这一方法的有效性。因此，在运用 PCCS 色彩体系进行色彩设计的过程中，结合灰色关联分析能够更为准确地求解目标色彩在色彩体系中的意象评价值，同时令评价结果更贴近用户的主观意象。

2.2 色彩意象评值获取

灰色关联分析通过计算两个对象之间的位移差来体现两者的相似程度，而日常使用的 RGB 色彩模式属于非均匀色彩模式，在其光谱中几何距离的变化与人眼观察到的色差变化不成比例，人对于等距色彩的意象感知浮动较大，进而导致使用 RGB 色值计算出的灰色关联度无法准确判断目标色彩与参考色彩的相近关系，因此有必要引入一个均匀色彩模式，将色彩的 RGB 色值予以转置再进行灰色关联度计算。

由国际照明委员会（Commission Internationale de l'Eclairage，CIE）制定的 Lab 色彩模式色域宽广，可以映射 RGB 色彩模式中的所有色彩，同时能够弥补 RGB 色彩模式色彩分布不均的不足，具有一定距离内两点之间的色彩均匀分布的优势。RGB 色值无法直接实现向 Lab 色值的转置，需要 XYZ 色彩模式过渡，X、Y、Z 三颜色刺激值与 R、G、B 色值之间的转换矩阵，见式（1）[27]。

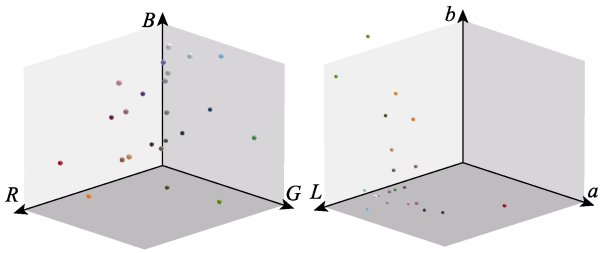
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \tag{1}$$

求得 X、Y、Z 三颜色刺激值后，根据 CIE1976 均匀色彩空间 Lab 的计算公式（2）即可求得色彩在 Lab 色彩模式中的色值。

$$\begin{cases} L = 116\left(\dfrac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \\ a = 500\left[\left(\dfrac{X}{X_0}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\dfrac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}}\right] \\ b = 200\left[\left(\dfrac{Y}{Y_0}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\dfrac{Z}{Z_0}\right)^{\frac{1}{3}}\right] \end{cases} \tag{2}$$

式中：X_0、Y_0、Z_0 分别为标准光源 D_{65} 的三刺激值；$X_0 = 95.045$，$Y_0 = 100$，$Z_0 = 108.89$。

通过计算将 25 个色彩样本色值转置为 Lab 色彩模式，并分别以色彩样本的 R、G、B 值和 L、a、b 值为坐标绘制色彩样本在两种色彩模式下形成的色彩空间，其结果见图 6。



a RGB色彩空间　　b Lab色彩空间

图 6　色彩样本在色彩空间中的分布

Fig.6 Distribution of color samples in color space

色彩色值转置完成后，构建基于灰色关联分析的色彩设计评价模型，其构建流程如下。

以 25 个 PCCS 代表性色彩样本为基础样本，则对任意随机色彩在基础样本中都有与之相对应的两个临近色彩，设参考对象和比较对象分别为 X_0 和 X_i，见式（3）。

$$\begin{cases} X_0 = \{x_0(k), k = 1, 2, \cdots, n\} \\ X_i = \{x_i(k), k = 1, 2, \cdots, n\}, (i = 1, 2, \cdots, m) \end{cases} \tag{3}$$

参与灰色关联度计算的三项指标 L、a、b 分别指代亮度及 Lab 色彩模式下的两个颜色通道，三者共同决定了色彩在 Lab 色彩模式下的确切属性，在重要程度上享有同等优先级，故在计算色彩灰色关联度时暂不考虑指标权重对计算结果造成的影响，则 X_0 与 X_i 之间的灰色关联度 $\gamma(X_0, X_i)$，见式（4）~（5）。

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\gamma(x_0(k), x_i(k)) \tag{4}$$

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \zeta \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \tag{5}$$

式中：ζ 为辨别系数，用以提高关联度之间的差异显著性，防止关联度失真，且 $\zeta \in [0,1]$，一般取 0.5 参与计算。

通过式（4）~（5）可计算任意色彩 X_i 与相邻色彩 X_{01} 和 X_{02} 之间的灰色关联度，结合色彩语义量化实验的评价结果即可求取色彩 X_i 的意象评价值 e_i，其求解见式（6）。

$$\begin{cases} a_1 = \gamma(X_{01}, X_i) / \{\gamma(X_{01}, X_i) + \gamma(X_{02}, X_i)\} \\ a_2 = \gamma(X_{02}, X_i) / \{\gamma(X_{01}, X_i) + \gamma(X_{02}, X_i)\} \\ e_i = e_{01}a_1 + e_{02}a_2 \end{cases} \tag{6}$$

式中：a_1，a_2 为色彩样本 X_{01} 和 X_{02} 的意象评价权重系数；e_{01}，e_{02} 为色彩样本 X_{01} 和 X_{02} 的意象评价值。

3　实例验证与分析

3.1　实验方案设置

以双色儿童玩具车为对象进行色彩设计，验证基于PCCS色彩体系和灰色关联分析的色彩设计方法有效性。依照产品特性及功能分区对双色儿童玩具车表面进行划分，去除无彩色金属区域后，将产品表面分为主色区 A 及副色区 B 并根据两者的可见面积计算其面积占比为 $P_A = 0.6$ 和 $P_B = 0.4$。邀请设计人员为儿童玩具车赋色，共获得 5 组色彩方案，见图 7。将每个色彩方案的主色及副色色值转置为 Lab 色彩模式，其具体数值见表 4。

a 方案一　　b 方案二　　c 方案三

e 方案五　　d 方案四

图 7　5 组色彩方案

Fig.7 Five groups of color schemes

表 4　5 组色彩方案 Lab 值

Tab.4 Lab values for five groups of color schemes

色彩方案	主色 $A(L, a, b)$	副色 $B(L, a, b)$
1	(54, 66.9, 31.4)	(43, –21.6, –6.5)
2	(53.1, –27.1, –11)	(74.3, –24.3, 8)
3	(79.1, –24.1, 19.1)	(65.5, –14.4, –12)
4	(94, –7.3, 4.9)	(79.7, –34.8, –9)
5	(62.5, –37.1, 6.7)	(69.8, –20.3, 43)

3.2 色彩方案灰色关联度意象评价

通过色彩设计，方案中的任一色彩都能在 25 个基础色彩样本中确定相应的临近色彩及其在 Lab 色彩模式下的色值。设双色儿童玩具车主色 A 经由灰色关联分析求取的色彩意象评值为 $e_A(n)$，副色 B 的色彩意象评值为 $e_B(n)$，则双色儿童玩具车整体色彩意象见式（7）。

$$E(n)=e_A(n)P_A+e_B(n)P_B,(n=1,2,\cdots,5) \tag{7}$$

以色彩方案 1 为例，方案中主色 A (54, 66.9, 31.4) 的临近色彩样本分别为 A_1 (55.6,46.9,–2.5)和 A_6 (82.8, 12.1, 38.5)，副色 B (43, –21.6, –6.5)的临近色彩样本分别为 B_{17} (48.2, –18.4, –21.6)和 B_{25} (59.1, –22.4, –7)。代入式（4）~（5），求得主色 A 与 A_1 和 A_6 的灰色关联度为 $\gamma(A,A_1)=0.78$，$\gamma(A,A_6)=0.5$，副色 B 与 B_{17} 和 B_{25} 的灰色关联度为 $\gamma(B,B_{17})=0.68$，$\gamma(B,B_{25})=0.91$，将计算所得的灰色关联度代入式（6）求得主色 A 的临近色彩样本 A_1 与 A_6 的意象评价权重系数分别为 0.61 与 0.39，副色 B 的临近色彩样本 B_{17} 与 B_{25} 的意象评价权重系数分别为 0.43 与 0.57。结合主副色临近色彩样本在新鲜、希望、生动语汇尺度下的色彩意象评值分别为 3.57、3.85 与 1.79、1.81，计算可得主色 A 的意象评值为 3.68，副色 B 的意象评值为 1.80，将主副色意象评值代入式（7），结合面积占比 P_A 和 P_B 得到色彩方案 1 在新鲜、希望、生动语汇尺度下的整体色彩意象评值为 2.93。同理求得该语汇尺度下其余 4 组色彩方案的主副色意象评值与方案整体色彩意象评值情况，色彩方案 2 为 2.78、1.98 与 2.46，色彩方案 3 为 2.27、1.88 与 2.11，色彩方案 4 为 2.88、2.44 与 2.70，色彩方案 5 为 2.93、2.79 与 2.87。以此为数据样本绘制图示，并应用同种方式绘制 5 组色彩方案在其余 4 个语汇尺度下的图示，最终结果见图 8。

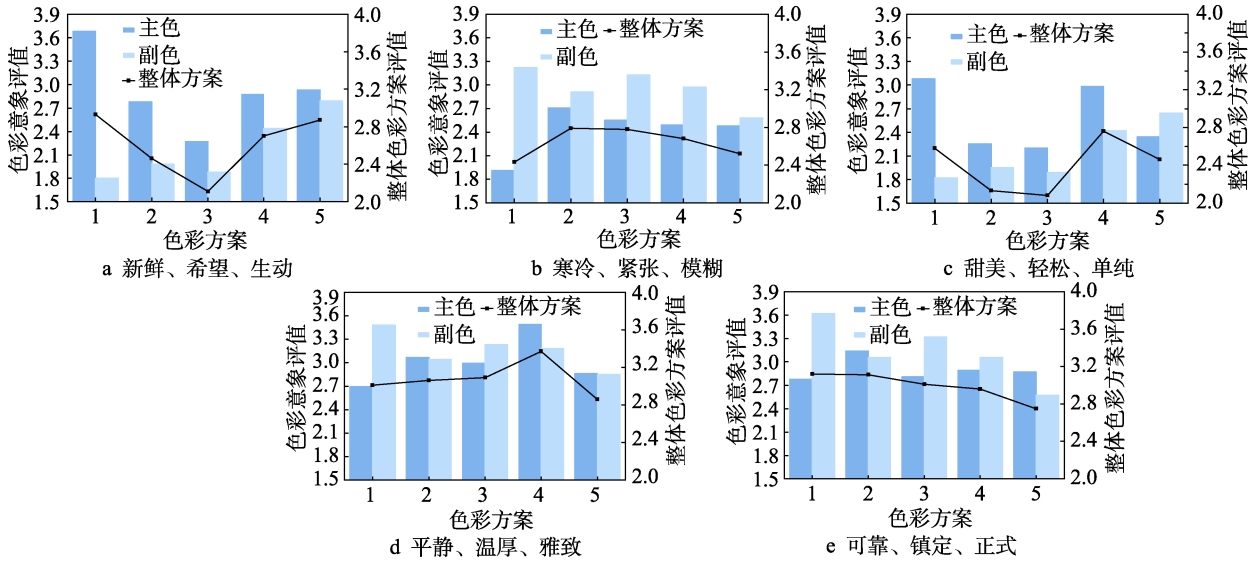


图 8 主副色及整体方案的意象评值

Fig.8 Image ratings of primary and secondary colors and overall scheme

如图 8 所示，比较分析 5 组色彩方案在不同语汇尺度下的意象评值以对色彩方案进行优选。以甜美、轻松、单纯语汇尺度为例，5 组色彩方案的整体意象评值分别为 2.58、2.13、2.08、2.76、2.46。因此，在以该语汇尺度为意象对双色儿童玩具车进行色彩设计时，色彩方案 4 最为贴合意象需求具有较高的可取性。为了验证方法的有效性与合理性，邀请 12 位具有丰富产品色彩设计经验的设计人员以相同语汇尺度对 5 组色彩方案进行主观评价，评价采用五分制，意象契合程度随分值升高而增大，设计人员评价结果与计算得出的方案意象评值对照关系（见图 9）。如图 9 所示，设计人员对 5 组色彩方案的主观评价结果与计算所得的意象评值具有高度相似性，最终的方案优选结果也一致，证明该方法在实际产品色彩设计过程中具有一定的应用价值。

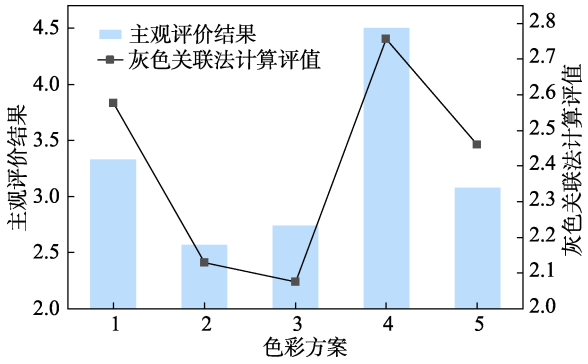


图 9 主观评价与计算所得结果对照

Fig.9 Comparison of subject evaluation and calculated results

此外，结合方案效果图进一步分析甜美、轻松、单纯语汇尺度下色彩方案的意象评值结果，可以发现色彩方案 1 与色彩方案 5 两个方案中使用到的 4 个色

彩隶属于不同色系，色相差异明显，单色色彩意象的评值也存在较大的跨度，色彩方案 1 中主色与副色的色彩意象评值差距尤为巨大，然而两个方案的整体色彩意象评值却极为相近。同时对比色彩方案 1 与色彩方案 4，两者主色的色彩意象评值相近，副色的色彩意象评值差异较大，最终色彩方案 4 的整体色彩意象评值也高于色彩方案 1。由此可以获得以下方面结果。

1）不同的色彩经过设计最终在产品表面可以给予用户相似的整体意象感受，在产品的色彩设计中，产品整体的色彩意象评值不由单一色彩决定，同时也不受主副色彩意象评值差异的干扰。

2）当产品具有主题色、品牌色等明确的色彩要求，即色彩方案中某一色彩的意象评值固定时，根据基于灰色关联分析的产品色彩意象计算公式（7），最终产品的整体色彩意象评值与另一色彩的意象评值正相关，选用需求意象高评值的色彩将使产品更符合设计目标。

据此，基于 PCCS 色彩体系和灰色关联分析的色彩设计方法不仅可以用于产品最终色彩方案的优选，在一定情境下也可以帮助设计师依照设计需要在色彩库中筛选确定色彩，产出多样丰富的产品色彩预选方案。

3.3　基于灰色关联度的色彩筛选与确定

对固有色彩进行色彩组合，构建产品整体色彩效果是色彩设计的重要方向，同时也是现实背景下色彩设计师面对的主要问题之一。设计师需要从固有色彩出发，尝试多样的色彩组合，形成多意象多视效的色彩预选方案以参与后续的优选阶段。利用基于灰色关联分析的产品色彩意象计算，见式（4）~（6），结合色彩语义量化实验获取的 25 个 PCCS 基础色彩样本的意象评值可以帮助设计师快速锁定色彩位置，筛选色彩区间，实现色彩预选方案的高效获取。

仍以双色儿童玩具车为对象，选取甜美、轻松、单纯为产品色彩设计的目标意象，确定产品主色为 A_2 (74.7, –61.5, 51.7)进行产品预选方案的色彩设计。主色 A_2 的色彩意象评值为 2.72，根据产品整体色彩意象评值与副色意象评值的正相关关系，以甜美、轻松、单纯为关键词对剩余 24 个色彩样本的意象评值排序，得到顺位前三的色彩分别为 B_{19} (90.5, –17.1, –1.3)、B_{12} (82.6, 7.9, – 4.6) 、B_6 (82.8, 12.1, 38.5) 。为了扩大色彩的可选范围，需要以基础色彩样本的色值为中心进行扩展，在 24 色色相环中选取夹角为 30°的相邻色彩，计算两者的灰色关联度作为参照基准，扩展主色及三个副色的色彩范围，并采用阴影的形式将其表现在色彩空间中，最终结果见图 10。图中蓝色阴影范围内色彩与主色具有较高灰色关联度，在色相上也极为接近，选用此类色彩参与方案设计色彩识别性弱，无法达到儿童玩具车双色设计预期，应尽量避免使用。红色阴影范围内色彩延承了色彩中心的高意象评值，与主色组合使用可获得高意象评值的色彩方案。以此为例，通过副色色彩中心的定位与色彩范围的扩展可大幅提高色彩方案的设计效率。

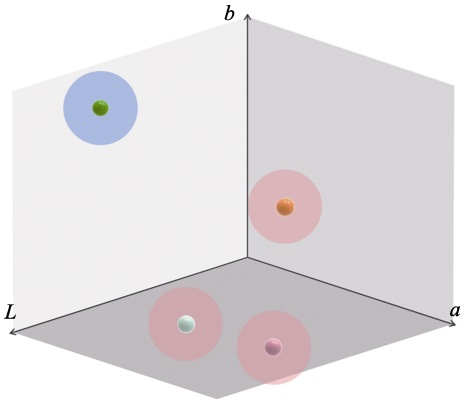


图 10　主副色在色彩空间中的定位与扩展
Fig.10 Positioning and expansion of primary and secondary colors in color space

4　结语

得益于 PCCS 色彩体系在色彩设计领域的独特优势，本文基于 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的色彩设计评价模型，并以双色儿童玩具车为实例验证了该方法的可行性，获得了主要结论：通过构建的产品色彩设计评价模型能够快速获得任一色彩设计方案的整体意象评值，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；基于产品色彩评价模型得到的整体产品意象评值与独立色彩意象评值之间的正相关关系，能够在色彩空间中快速定位筛选目标色彩，节约设计过程中的时间成本，高效实现产品色彩设计方案的获取。本研究所提出的方法在产品色彩设计领域仍有提升空间，未来重点将从色彩学中色彩平衡、色彩和谐等角度出发，引入契合的美学评价手段进一步提高色彩方案的美学价值和设计质量。

参考文献：

[1] 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.

[2] 宗立成. 产品情感配色的计算机辅助设计及其评价方法[J]. 图学学报, 2018, 39(4): 623-628.
ZONG Li-cheng. On Computer Aided Design of Product Emotion Color Matching and Its Evaluation Method[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(4): 623-628.

[3] DING Man, CHENG Yu, ZHANG Jin-yong, et al. Product Color Emotional Design Based on a Convolu-

tional Neural Network and Search Neural Network[J]. Color Research & Application, 2021, 46(6): 1332-1346.

[4] 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. Hierarchical Multi-Hive Bee Colony Algorithm for Computer Aided Color Design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(2): 381-389.

[5] 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. Product Color Emotional Design Based on Deep Learning[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(2): 381-389.

[6] 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.

[7] 吴天宇, 赵祎乾, 李亚军, 等. 基于混合感性工学模型的产品色彩设计方法[J]. 机械设计, 2021, 38(7): 140-144.
WU Tian-yu, ZHAO Yi-qian, LI Ya-jun, et al. Design Method of Product Color Based on Hybrid Kansei Engineering Model[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(7): 140-144.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 黄茜, 陈飞虎. 四大色彩体系对比分析研究[J]. 包装工程, 2019, 40(8): 266-272.
HUANG Qian, CHEN Fei-hu. Comparative Analysis of Four Major Color Systems[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(8): 266-272.

[12] 刘珈利, 贺荣, 田伟, 等. 色彩体系发展概述及其在傣锦设计中的实践[J]. 丝绸, 2021, 58(9): 117-125.
LIU Jia-li, HE Rong, TIAN Wei, et al. An Overview of Color System Development and Its Application in Dai Brocade Design[J]. Journal of Silk, 2021, 58(9): 117-125.

[13] 高帅, 朱丽萍, 李永锋. 基于灰色聚类法的老年人 APP 用户界面配色评价研究[J]. 包装工程, 2021, 42(6): 198-205.
GAO Shuai, ZHU Li-ping, LI Yong-feng. Color Matching Evaluation of APP User Interface for Elderly Based on Grey Clustering Method[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(6): 198-205.

[14] 董可然, 宋方昊. 基于地域色彩观的爱马仕色彩设计战略研究[J]. 包装工程, 2020, 41(20): 274-279.
DONG Ke-ran, SONG Fang-hao. Hermès Color Design Strategy Based on Regional Color View[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(20): 274-279.

[15] 陈伟伟, 陈雁. 基于 PCCS 体系的服装色彩与服装风格的色彩空间匹配分析[J]. 丝绸, 2019, 56(1): 66-72.
CHEN Wei-wei, CHEN Yan. Color Space Matching Analysis of Clothing Colors and Clothing Styles Based on PCCS Color System[J]. Journal of Silk, 2019, 56(1): 66-72.

[16] 金冬, 刘玉萱. 基于 PCCS 表色系统的东方邦太橱柜色彩策略研究[J]. 家具与室内装饰, 2021(12): 96-99.
JIN Dong, LIU Yu-xuan. Research on the Color Strategy of BIG TIME Cabinet Based on PCCS Table Color System[J]. Furniture & Interior Design, 2021(12): 96-99.

[17] JIN Jing, SHEN Hua-qing. Research about UI Color Preference for Mobile Terminal Based on the User's Visual Thinking and Perception[C]// LONG S, DHILLON B. International Conference on Man-Machine-Environment System Engineering. Singapore: Springer, 2019: 323-331.

[18] HSIAO S W, YANG Meng-hua. A Methodology for Predicting the Color Trend to Get a Three-Colored Combination[J]. Color Research & Application, 2017, 42(1): 102-114.

[19] 宫琳, 张子健, 谢剑, 等. 融合设计过程与设计知识的产品概念设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(3): 597-610.
GONG Lin, ZHANG Zi-jian, XIE Jian, et al. Product Conceptual Design Method Integrating Design Process and Design Knowledge[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(3): 597-610.

[20] WANG Wen-qing, FU Cheng-jie, SHEN Xue-hui. Research on Lipstick Modeling Based on Grey Relational Analysis[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 440(5): 052027.

[21] WANG Han-you. User Classified Algorithm and Model Based Gold Jewelry Design Definition[J]. Cluster Computing, 2019, 22(3): 6741-6753.

[22] WEI Yun-yun. Form Factors of Modeling Language under Different Color Schemes with Grey Relational Analysis Based on Entropy Method[J]. Int J Pattern Recognit Artif Intell, 2019, 33: 1950011: 1-1950011: 23.

（下转第 321 页）