

基于 VIKOR 的轮式装载机配色设计与评价研究

冯青, 程子木*

(西安科技大学, 西安 710054)

摘要: **目的** 将用户内隐的色彩意象感知进行外化并加以定量描述, 减少由于多指标权重模糊造成的配色方案评价结果误差, 保持设计与评价原则的一致性。**方法** 结合因子分析-熵权法与多准则妥协解排序的配色设计与方案评价方法, 运用德尔菲法等建立目标色彩意象词汇集, 通过设定等距间隔在 RGB 参数值域内获取具备代表性的备选主色样本库; 采用语义差异法构建评价矩阵, 通过因子分析进行降维提取色彩因子, 结合熵权法得到色彩意象评分模型, 对各色彩样本打分后排序, 获取备选主色库; 以色相距离理论为依据形成辅助色选取原则; 根据指标赋权后的 VIKOR 对多个备选方案评价, 得到合理排序结果。**结论** 以某型轮式装载机的涂装配色设计与方案评价进行了实例验证, 结果表明这个研究方法在多配色方案评价时充分考虑了各指标信息量, 有助于设计师深入挖掘用户潜在的色彩设计需求。

关键词: 工业设计; 配色设计; 色彩意象; 因子分析; 熵权法; VIKOR

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)18-0042-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.18.006

Color Matching Design and Evaluation of Wheel Loader Based on VIKOR

FENG Qing, CHENG Zi-mu*

(Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

ABSTRACT: The work aims to externalize and quantitatively describe the user's implicit color image perception, reduce the error of color scheme evaluation result caused by multi-index weight blur, and maintain the consistency of design and evaluation principles. A color matching design and scheme evaluation method combining factor analysis-entropy weight method and multi-criterion compromise solution ranking was proposed. The Delphi method and other methods were used to establish a target color image vocabulary set and the representative alternative dominant color sample library was obtained from the RGB parameter range by setting equidistant intervals. The semantic difference method was used to construct the evaluation matrix, the factor analysis was carried out to extract the color factors, the color image scoring model was obtained by combining the entropy weight method, and the color samples were scored and ranked to obtain the alternative dominant color library. Based on hue distance theory, the auxiliary color selection principle was formed. According to the index-empowered VIKOR method, multiple alternatives were evaluated and reasonable ranking results were obtained. The color matching design and scheme evaluation of a certain type of wheel loader are verified by example, and the results show that this research method fully considers the amount of information of each index when evaluating multiple color matching schemes, which helps designers to dig deep into the potential color needs of users.

KEY WORDS: industrial design; color matching design; color image; factor analysis; entropy weight method; VIKOR method

设计符合研究对象自身特征的色彩形象, 有助于塑造产品形象, 传递其内涵^[1-2]。配色设计中存在色彩意象感知模糊, 在做评价时设计方案易被决策者专

业经验影响的问题。因此, 感性工学和多准则决策逐渐成为色彩设计研究领域的热点。张琳等^[3]借助邓氏关联度的数学模型, 实现了将用户对产品色彩意象从

主观模糊表达达到具体色彩意象评价的转化。杨延璞等^[4]将色彩案例和灰度关联分析结合, 实现了将案例色彩向目标产品配色的转换研究。丁满等^[5]结合内隐测量技术和 BP 神经网络, 明晰了用户的色彩情感意象。在方案评价方面常用多准则决策方法, 尚凯等^[6]和王志愿等^[7]将熵权法与 VIKOR 结合, 用客观赋权的思路解决评价过程中的不确定性。只有在评价时考虑主客观综合权重, 才能更全面地展现信息量, 且设计和评价保持原则连贯性有助于增加设计实践的整体性。因此, 将因子分析-熵权法与 VIKOR 相结合, 用于配色设计和方案优选研究, 以期在有助于设计人员挖掘色彩样本与意象间潜在联系的同时, 还能保持设计和方案评价的原则统一性, 从而达到兼顾主客观综合评价的价值, 提升决策的准确度。

1 因子分析-熵权法与 VIKOR

因子分析的基本思想是将多个原变量降维, 综合成少数几个不易被直接观测到的综合指标^[8]。降维后的结果不仅减少了信息量缺失, 还具有更符合实际意义的解释。将这个方法应用于色彩意象到设计参数的转换中, 有助于分析出用户内隐的色彩偏好, 同时保留大部分原始描述信息。

熵权法作为一种客观赋权法^[9], 它的原理是依据

原数据之间的差异来确定指标权重, 如果某个指标的信息熵越小, 在评价中所起的作用越大。

主观和客观权重计算方法, 在单独使用时都存在不同的缺陷, 但是将两者结合, 可以很好地解决各自的局限, 体现更为全面的信息^[10]。因此, 可选择利用因子分析-熵权法对多个色彩语义词汇进行降维, 提取色彩因子并赋予综合权重, 建立针对样本的色彩意象评分模型。

OPRICOVIC^[11-12]提出的多准则妥协解排序法 (VlseKriterijumska Opti-mizacija I Kompromisno Resenje, VIKOR), 是一种针对复杂系统的多准则优化决策方法, 海明距离和切比雪夫距离是其数学基础。该方法通过先确定正负理想解, 然后以多备选方案与理想方案的接近程度为依据进行优劣排序。但在 VIKOR 实施时缺少指标权重的具体数值^[13], 可采用因子分析-熵权法计算出的综合权重对这个不足做出改进, 得到更准确的评价结果。

2 基于因子分析-熵权与 VIKOR 的配色设计及评价流程

利用因子分析-熵权法与 VIKOR 的配色设计与方案评价方法的具体流程, 见图 1。

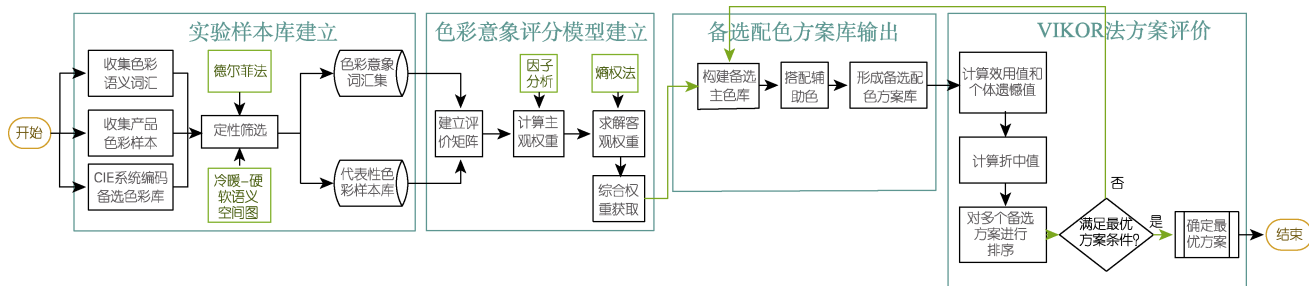


图 1 配色设计与方案评价流程

Fig.1 Flow chart of color matching design and scheme evaluation

2.1 实验主色样本库构建

2.1.1 备选主色基础样本库的建立

依据文献^[14], 色彩样本在 RGB 参数值 0~255, 通过等间距序列参数以充分描述, 用 $C_i = \{R_i, G_i, B_i\}$ 表示。选择通过固定间隔获取色彩样本, 作为后续主色样本库建立的基础。

2.1.2 代表性主色样本库的建立

从众多描述产品的色彩感性词汇中, 定位用户需求并合理选取色彩对产品配色方案的成功有显著影响^[15]。但问题在于通常用户因缺乏设计知识对色彩的需求描述是相对模糊的, 所以需要结合定性与定量分析将其转换为具有共性且更明确的感性语义, 以便于设计人员通过设计要素来表现。根据设计目标广泛收集产品图片及其色彩描述的形容词, 在邀请专家进

行初筛后, 置入冷暖-硬软语义空间图^[16-17], 为减少与专业意见无关因素的影响, 分别采用德尔菲法和名义群体法进一步筛选得到 q 个产品目标性色彩意象词汇与 m 个代表性色彩样本。德尔菲法作为一种专家评估方法, 属于群体决策行为, 由美国兰德公司的 GORDON 等^[18]于 1964 年首次用于技术预测中。参与者根据组织者提供的问卷, 成员之间采用“背靠背”方式匿名交流意见并评估, 经过多轮迭代后, 使得分散的意见逐渐收敛集中到基本一致的结果。DELBECQ 等^[19]所提出的名义群体法主要通过对群体成员之间的讨论和人际沟通加以限制, 得到较为独立的意见。整个流程由独立生成想法、阐述、群体讨论评价、汇总排序四个阶段组成。这两种决策方法都在保留了群体共同思考优势的同时, 尽量避免了例如社会地位等非相关因素的干扰。

2.2 色彩意象评分模型建立

2.2.1 因子分析降维及主客观权重计算

通过因子分析对 q 个词汇降维, 得到 n 个色彩因子 ($n < q$), 其矩阵形式, 见式 (1)。

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}\mathbf{F} + \boldsymbol{\varepsilon}$$
 (1)

式中: $\mathbf{F}$ 为公共因子; $\mathbf{A}$ 为因子载荷矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为特殊因子。

将 m 个色彩样本与选定的 q 个色彩意象语义结合, 按照 SD 法设计调查问卷, 采用李克特 7 级量表进行评分, 其中: 1 表示“非常不符合”, 随着偏好逐渐变化, 4 为“一般”, 直至 7 变为“非常符合”。邀请被试者进行问卷填写后, 汇总评分结果, 得到原始矩阵 $\mathbf{B}$ 。 $\mathbf{B}_{mq}^p$ 则表示: 第 p 个被试者对第 m 个色彩样本在第 q 个色彩语义上的评分值。再进行均值处理得到 $\mathbf{B}_1$ 。

在正式运算之前, 需对原始变量之间的相关性以及相关程度进行检验, 以保证结果有效性。根据因子载荷矩阵对提取的因子命名, 第 j 个因子的主观评价所得权重值为 w_{sj} 。

2.2.2 熵权法获取客观权重

建立 m 个色彩样本对 n 个色彩因子的原始评价矩阵 $\mathbf{R}'$ 。 r'_{ij} 为第 i 个色彩样本在第 j 个因子上的所有被试者评价均值。然后对 $\mathbf{R}'$ 进行标准化处理 (本文中各评价指标均为正向指标), 见式 (2)。

$$r_{ij} = \frac{r'_{ij} - \min_i(r'_{ij})}{\max_i(r'_{ij}) - \min_i(r'_{ij})}$$
 (2)

$\mathbf{R}'$ 标准化处理后, 得式 (3)。

$$\mathbf{R} = (r_{ij})_{m \times n}$$
 (3)

对第 i 个色彩样本在第 j 个色彩因子的指标值比重, 见式 (4)。

$$P_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^m r_{ij} \quad i=1,2,\cdots,m; j=1,2, \cdots,n$$
 (4)

第 j 个因子的信息熵 e_j , 见式 (5)。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} \cdot \ln P_{ij}$$
 (5)

式中: k 为常数, $k=1/\ln m$ 。

然后计算各因子客观权重 w_{oj} , 见式 (6)。

$$w_{oj} = g_j / \sum_{j=1}^n g_j$$
 (6)

式中: g_j 为第 j 个因子的偏差度, 其差异系数的计算, 见式 (7)。

$$g_j = 1 - e_j$$
 (7)

2.2.3 色彩意象评分模型建立

求解各因子综合权重 w_j , 见式 (8)。

$$w_j = \frac{w_{sj} w_{oj}}{\sum_{j=1}^n w_{sj} w_{oj}}$$
 (8)

色彩样本意象评价模型的计算, 见式 (9)。

$$F_i = w_1 F_{i1} + w_2 F_{i2} + \cdots + w_j F_{ij} + \cdots + w_n F_{in}$$
 (9)

式中: F_{ij} 为全部评价者对第 i 个色彩样本在第 j 个色彩因子上评分处理后的均值。

2.3 配色方案输出

制作产品赋色样本, 根据功能区分划分主辅色赋色区域。邀请多位设计人员, 对 m 个样本以 10 分制打分, 据式 (9) 算得分并排序, 排名前三的色彩样本为备选主色库 $D=\{d_1, d_2, d_3\}$ 。

在朝仓直巳^[20]基于色相距离建立的配色设计原则基础上, 加入对无彩色的考量, 初步划分辅助色选取的范围。因各区间内色彩众多, 需进一步缩小取色角度。在确定了主色的基础上, 运用矩形四元配色法在色环上形成一个矩形, 各相邻色相之间相差 60° , 可以达到在各自区间内选取有代表性且角度具体的颜色作为辅助色, 即互补色、对比色等 (如表 1 所示)。这样在提升辅助色选取准确性的同时, 也保证了配色方案色彩意象的代表性。

表 1 辅助色选色原则
Tab.1 Auxiliary color selection principles

配色设计原则	对色强度	色相距离/(°)	辅助色选色	辅助色具体角/(°)	色彩意象
强对比色系相配色	最强对比	165~180	互补色	180	对比、强烈、突出
	次强对比	150~165			愉快、紧张、反差
	强度对比	120~150			醒目、活力、碰撞
中度对比色系相配色	中强度对比	90~120	对比色	120	独特、直接、丰富
	中弱度对比	60~90			生动、明晰、含蓄
弱对比色系相配色	近似色相	30~60	邻近色	60	高雅、淳朴、协调
	邻近色相	10~30			和谐、舒适、微妙
单色相配色	单色相	0~10	单色相	0~10	调和、单一、平静
无彩色色相配色	黑、白、灰		黑、白、灰	黑、白、灰	中性、严谨、理性

2.4 VIKOR 方案优选

对以 $D=\{d_1, d_2, d_3\}$ 为主色, 在表 1 配色原则指导下形成的 21 个配色设计备选方案, 根据因子分析降维后的 n 个评价指标进行打分, 得到原始评价矩阵 L , 见式 (10)。

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1n} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{h1} & l_{h2} & \dots & l_{hn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

对原始评价矩阵 L 进行标准化处理 (文中指标均为效益型), x_{ij} 为原矩阵中对应 l_{ij} 处理后的数值, 处理过程, 见式 (11)。

$$x_{ij} = \frac{l_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^h (l_{ij})^2}} \quad (11)$$

确定备选方案集的正理想解为 Z^+ 、负理想解为 Z^- , 计算见式 (12) — (13)。

$$Z^+ = \{x_j^+\} = \max_{i=1}^h \{x_{ij}\} \quad (12)$$

$$Z^- = \{x_j^-\} = \min_{i=1}^h \{x_{ij}\} \quad (13)$$

计算备选方案的群体效用值 S_i 以及最大个体遗憾值 R_i , 其计算见式 (14) — (15)。

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j \frac{(x_j^+ - x_{ij})}{(x_j^+ - x_j^-)} \quad (14)$$

$$R_i = \max_j w_j \frac{(x_j^+ - x_{ij})}{(x_j^+ - x_j^-)} \quad (15)$$

式中: w_j 为根据式 (8) 计算出的评价指标综合权重; x_{ij} 为对 l_{ij} 依据式 (11) 做规范化处理后的数值。

接着, 计算折衷值 Q_i , 见式 (16)。

$$Q_i = \varepsilon \frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-} + (1 - \varepsilon) \frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-} \quad (16)$$

式中: ε 为折衷系数, 取值在 $[0, 1]$, 做决策时一般取值为 0.5, 表示采用均衡的方式, 同时兼顾群体效益以及个体遗憾; $S^+ = \max_i \{S_i\}$, $S^- = \min_i \{S_i\}$;

$R^+ = \max_i \{R_i\}$, $R^- = \min_i \{R_i\}$ 。

最后通过 S_i , R_i , Q_i 三个数值对多个备选方案进行评价, 依照 Q_i 值从小到大的排序, 得到结果为: $l_1, l_2, \dots, l_{21}$, 最小数值的方案为最优。当方案 l_1 同时满足两个判断条件时, 则为评价最优方案, 这两个条件如下。

1) 具体见式 (17)。

$$Q_{(l_2)} - Q_{(l_1)} \geq 1/(h-1) \quad (17)$$

2) l_1 在 S_i 或 R_i 排序中至少有一项为最优。

3 实例验证

装载机的功能性和科学技术含量已经取得了明显的进步, 但是在产品外观的色彩选择方面, 却存在严重的同质化现象, 缺乏企业识别性, 大部分企业仍停留在工程黄的选择上。针对这个现状, 选取某型轮式装载机为设计对象进行实例验证。轮式装载机功能包括了举重物 (泥土、砾石等)、挖掘、拖运、搬运和运输等, 并且由于使用了轮子, 在道路上具有良好的机动性。外观设计结构主要涵盖车架、驾驶室、动臂、摇臂、铲斗和标识等。

3.1 色彩意象集和备选主色样本库建立

3.1.1 装载机赋色区域划分

以某型轮式装载机静止模式侧面为赋色样本, 根据文献[21]及工程装备制造企业现有资料和网络调研结果, 经焦点小组分析总结, 划分装载机涂装分级 A 级为主要表面, 具有高度视觉冲击性; B 级为次要表面, 具有一定的视觉冲击性; C 级则为除 A、B 外的其他面。区域划分结果见图 2。主色为 A 区域, 车身部位与品牌识别的相关区域与主色保持一致也归为 A 区; 辅色为 B 区域; 行走机构主体保持黑色不变; 由于 C 区域占比较小, 而本文重点在对更加具有视觉冲击力的表面区域进行配色设计, 在此阶段暂不考虑。

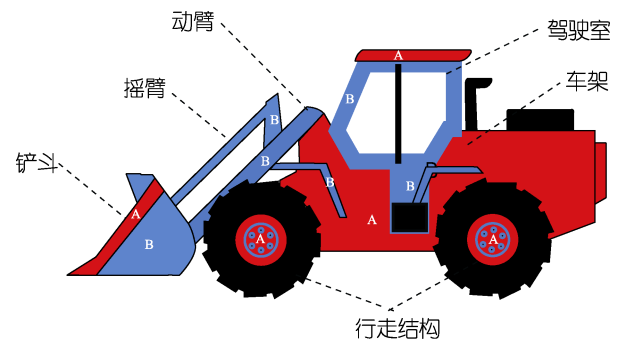


图 2 装载机附色区域展示图
Fig.2 Display map of colored area of loader

3.1.2 色彩意象词汇集建立

通过对企业的相关文件及文献资料进行分析, 得到国内外各大机械制造品牌的装载机图片以及大量装载机涂装色彩意象词汇。邀请 30 位工业设计研究生进行初筛并统一处理, 将处理后结果置于冷暖-硬软语义空间进行分析 (如图 3 所示)。采用德尔菲法以产品色彩定位贴合度为准则进行评选, 保留被选频率高于 85% 的词汇组成目标色彩意象词汇集 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{16}\}$ 分别对应: “独特的” “安全的” “机械的” “美观的” “现代的” “动感的” “科技的” “时尚的” “高端的” “简洁的” “稳重的” “严肃的” “未来的” “明亮的” “坚硬的” “醒目的”。



图 3 装载机样本与意象词汇分析
Fig.3 Loader samples and image vocabulary analysis

3.1.3 主色备选样本库建立

色彩样本的 RGB 数值在 0~255, 以 64 为固定单元间距获取^[14]。在每个原色轴得到 0, 64, 128, 192, 255 这五个参数时, 分别将其赋值于 $C_i = \{R, B, G\}$ 并进行调整排列, 最终可产生 125 个基本的备选主色样本。通过名义群体法, 从 125 个基本样本中剔除不符合产品色彩定位描述和重复相近的样本, 得到主色的备选样本库 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{30}\}$ 。筛选后的色彩样本展示, 见图 4。

3.2 配色方案生成

3.2.1 色彩因子提取

1) 建立评价矩阵。将目标意象词汇集通过 SD 法与图 4 备选主色样本库建立映射, 邀请工业设计研究生及驾驶员各 10 位, 依次在电脑上展示 30 个样本, 根据李克特 7 级量表打分, 将结果收集并做均值处理后, 得到评价矩阵 B_1 。

2) 相关性检验。将 B_1 导入 SPSS 25.0 进行因子分析, 检验 16 个意象词汇的相关性 (如表 2 所示),

$$B_1 = \begin{bmatrix} 4.167 & 3.167 & 3.417 & \dots & 3.167 & 4.833 \\ 4.417 & 2.833 & 3.667 & \dots & 3.000 & 4.667 \\ 4.500 & 3.667 & 3.167 & \dots & 2.917 & 4.833 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 5.417 & 3.167 & 4.833 & \dots & 5.250 & 5.500 \\ 4.583 & 2.917 & 5.250 & \dots & 6.000 & 5.333 \end{bmatrix} \quad (18)$$

结果显示 KMO 值为 0.885>0.7, 适合做因子分析, 且显著性<0.05, 满足相关性检验标准, 证明后续分析可继续进行且有效。

色彩因子提取采用主成分分析法, 总方差贡献率达到 87.9%。由于原始变量丢失信息较少, 因此可解释大部分原始信息。共提取五个因子。通过最大方差法对因子旋转命名, 因篇幅有限展示部分结果, 见表 3。

由分析可知, 因子 1 对“严肃的”“稳重的”“机械的”“未来的”“科技的”“动感的”解释程度较高; 因子 2 则主要包含了“明亮的”“醒目的”“现代的”“坚硬的”四个变量。经焦点小组研讨总结后将 $H = \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5\}$ 分别命名为: “前卫科技”“时尚

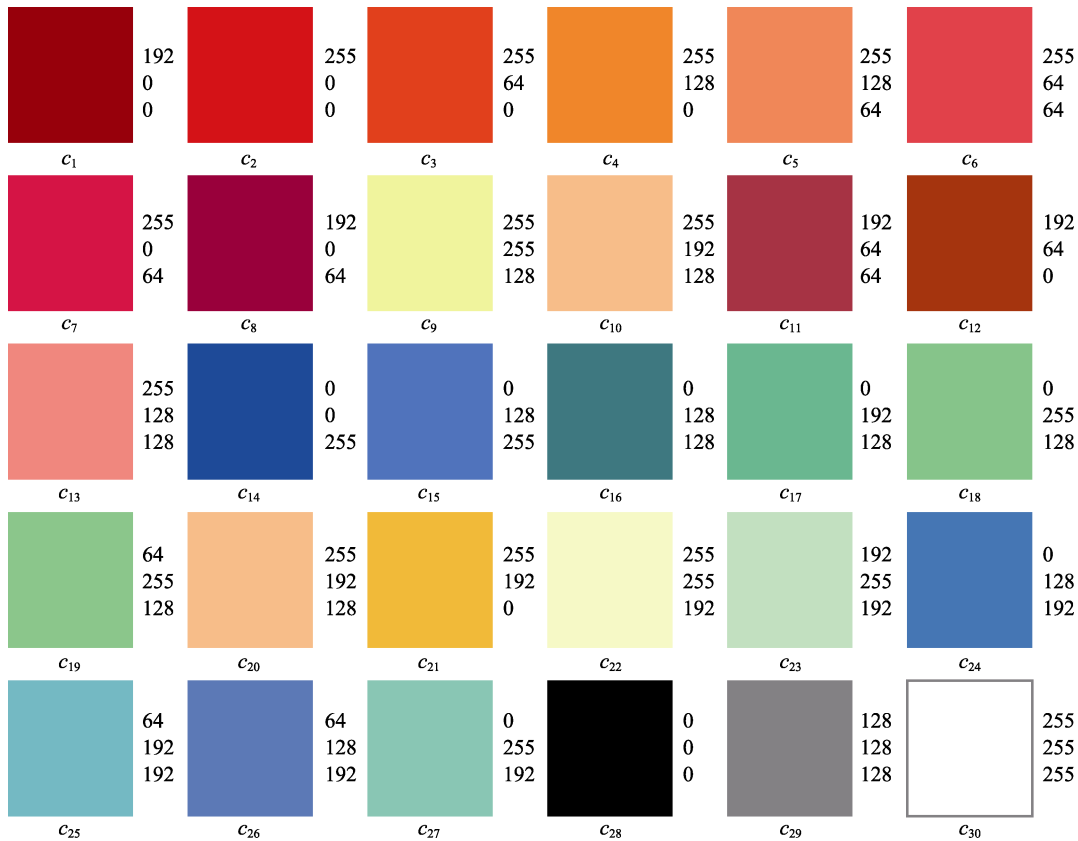


图 4 备选主色样本库
Fig.4 Alternative dominant color sample library

表 2 相关性检验结果
Tab.2 Correlation test results

KMO 取样适切性量数	巴特利特球形度检验		
	近似卡方	自由度	显著性
0.885	482.405	120	0

表 3 旋转后成分矩阵
Tab.3 Post-rotation component matrix

意象词汇编号	1	2	3	4	5
a_8	-0.920				
a_{12}	0.750	0.436	0.331		
a_{11}	0.722	0.427	0.411		
a_{10}	-0.693				0.439
a_3	0.690	0.526		0.327	
a_{13}	0.675	0.549			
a_9	-0.614		-0.305		
a_7	0.598	0.584			
a_6	0.594	0.551	0.347	0.311	
a_{14}		0.902			
a_{16}	0.421	0.722		0.338	
a_5	0.519	0.714			
a_{15}	0.595	0.668			
a_1			0.953		
a_2		0.380		0.839	
a_4					0.934

醒目”“独特沉稳”“安全易识别”“大方美观”。

3.2.2 色彩意象评分模型建立

用方差贡献率计各因子主观权重值 w_{sj} 。客观权重计算需邀请 30 位由工业设计研究生和驾驶员组成的专家小组以 $H = \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5\}$ 为指标，对 30 个色彩样本打分，用式（2）—（7）计算客观权重 w_{oj} ，并由式（8）得到各因子的综合权重 w_j ，上述计算结果的汇总，见表 4。

表 4 各因子权重结果汇总
Tab.4 Summary of weighting results of each factor

权重	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5
w_{sj}	0.38	0.294	0.120	0.106	0.100
w_{oj}	0.197	0.205	0.205	0.190	0.203
w_j	0.374	0.301	0.123	0.101	0.102

根据计算结果可知，在主观权重层面上， h_1 和 h_2 为主要因子， h_3 至 h_5 则为次要因子，其中“前卫科技”的权重值为 0.38，尤为突出，应在色彩选择中作为重点考虑指标。通过熵权法计算的各因子权重间差值比 w_{sj} 小，同时又不完全相等，说明在客观权重的层面上各因子都对意象评分具有重要作用，另一方面其作用又不完全相同，例如：“醒目”“独特”“美观”等

特性在评分中占据了主导地位。

综合权重更全面地反映了各因子所携带的信息价值。对用户而言,装载机的色彩形象需在重点表现其机械感和科技性的同时,符合时代的审美要求。另一方面具有标识性的独特色彩和产品安全性的体现也应该纳入配色设计的考虑范围内,且应把控整体效果呈现的色彩美观性。

将各个因子的综合权重代入式(9),得到具体的色彩意象评分模型,见式(19)。

$$F_i = 0.374F_{i1} + 0.301F_{i2} + 0.123F_{i3} + 0.101F_{i4} + 0.102F_{i5}$$

(19)

3.2.3 配色方案设计

邀请 12 位工业设计研究生,以与五个因子的贴合度为评价标准,对图 4 的样本在[1,100]进行打分,越接近 100 则说明被评价色彩样本越符合这个维度色彩因子的描述。将评分结果均值处理后,通过式(9)计算各样本的色彩意象得分并从高到低排序。因篇幅有限,在表 5 中仅展示排名前五的色彩样本的具体数值,此三色组成备选主色库。

主色虽占据影响整体色彩感觉的主要部分,但是辅助色选择的差异同样会左右整体色彩意象感知的结果。以主色 d_1 为例,依据表 1 建立的原则进行配色

设计,将 d_1 与黑、白、灰以及互补色、对比色、邻近色、同一色相颜色分别搭配,共计可生成出七种配色方案,将这一配色过程进行可视化演示,见图 5。

表 5 备选主色库
Tab.5 Alternative dominant color library

颜色	编号	R	G	B	得分
	d_1	255	192	0	78.401
	d_2	255	64	0	73.958
	d_3	0	128	192	71.796

图 5 中的辅助色参数值获取方面,黑、白两色 RGB 值均取固定值,灰色为中性灰即(128,128,128),单色相辅色取值与主色相同。考虑到不同色彩体系的色相环差异较大,为使得 d_i 的其他三个辅助色生成的计算过程准确且高效,借助 ColorGG 这一配色工具网站进行运算。该网站提供颜色代码查询及色彩空间转换等服务,将主色 d_i 的 RGB 数值转换为十六进制颜色码并输入,可获取针对 d_i 的互补色、对比色、邻近色的 RGB 数值。

为使参与者对配色效果有更直观具体的感受,对图 2 的二维色彩样本运用 Blender 3.0 软件进行建模,将 21 个配色方案赋色于模型后,进行渲染,具体色彩数值和渲染效果,见图 6。

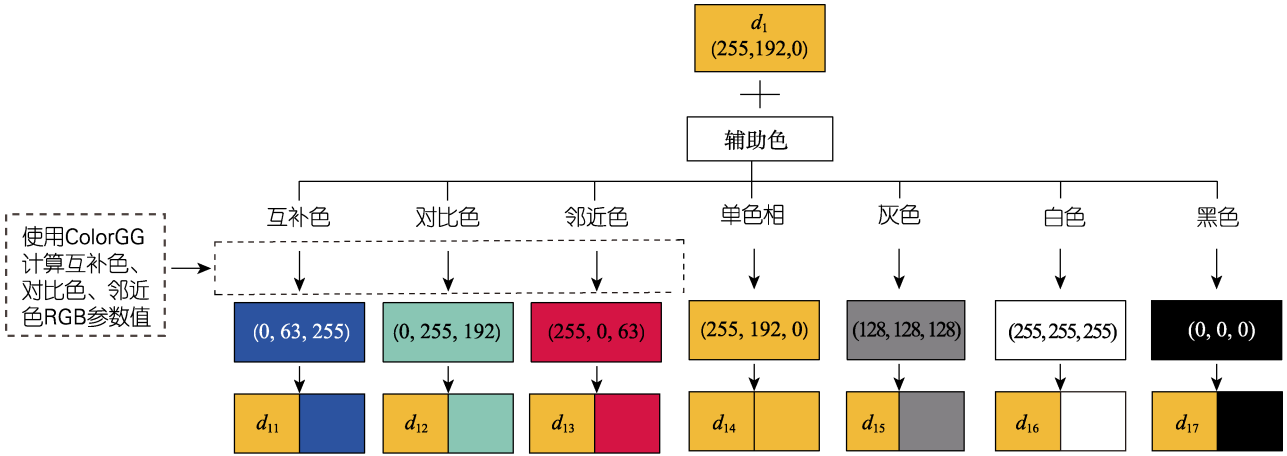


图 5 配色过程示意图
Fig.5 Color matching process diagram

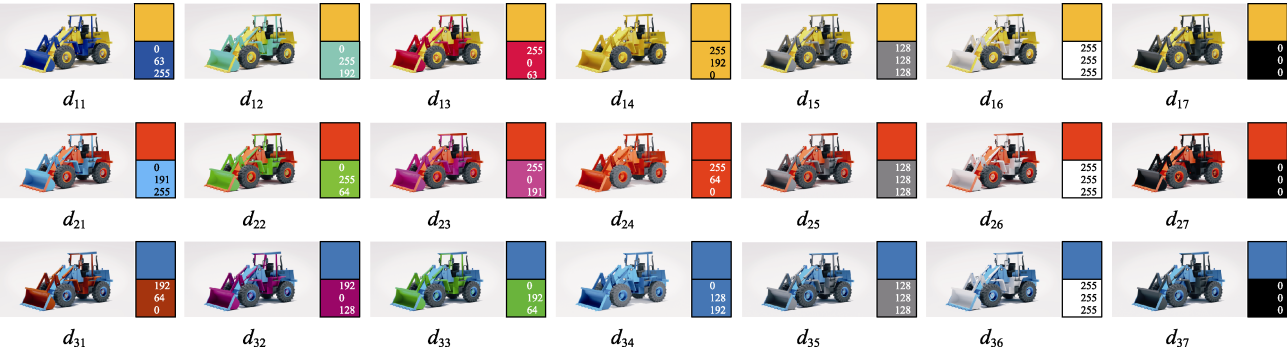


图 6 21 个配色方案展示
Fig.6 Display of 21 color matching schemes

3.3 方案评价

邀请 22 位由年龄在 22~55 岁的驾驶员和装载机生产企业工作人员组成的评审小组，在电脑屏幕上展示给被试者 21 个方案，并邀请被试者根据 $H =$

$\{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5\}$ 的描述对各方案以 10 分制进行打分，分值越大，则被评价方案越符合该因子的描述。统计评分后进行均值处理，然后将数据导入 SPSSAU 进行运算，结果如表 6 所示。

表 6 综合赋权后 VIKOR 评价结果
Tab.6 VIKOR evaluation results after comprehensive empowerment

配色方案	S	R_l	利益比率 Q 值	方案 (Q 值) 排名	排序结果
d_{11}	0.461	0.193 3	0.492 1	7	l_7
d_{12}	0.403 2	0.123 5	0.357 6	4	l_4
d_{13}	0.518 4	0.238 3	0.590 8	11	l_{11}
d_{14}	0.541	0.171 8	0.508 2	8	l_8
d_{15}	0.233 5	0.102	0.227	2	l_2
d_{16}	0.452	0.145	0.417 2	5	l_5
d_{17}	0.681	0.315 6	0.797 7	17	l_{17}
d_{21}	0.883 1	0.373 6	1	21	l_{21}
d_{22}	0.284 7	0.141 7	0.314 3	3	l_3
d_{23}	0.805 5	0.322 1	0.880 1	20	l_{20}
d_{24}	0.586 7	0.214 8	0.597	12	l_{12}
d_{25}	0.031 5	0.026 8	0	1	l_1
d_{26}	0.700 9	0.219	0.670 1	14	l_{14}
d_{27}	0.456 2	0.148 2	0.424 3	6	l_6
d_{31}	0.756 1	0.300 7	0.820 3	18	l_{18}
d_{32}	0.796 1	0.309 2	0.856	19	l_{19}
d_{33}	0.748 3	0.283 4	0.790 8	16	l_{16}
d_{34}	0.582 3	0.199 7	0.572 6	10	l_{10}
d_{35}	0.531 2	0.220 2	0.572 1	9	l_9
d_{36}	0.642 4	0.302 8	0.756 5	15	l_{15}
d_{37}	0.637 3	0.21 9	0.632 8	13	l_{13}

分析表 6 数据，可看出 d_{25} 配色方案在最优方案距离比值之和以及最优方案距离比值最大值均为最小，并且 $Q_{(l_2)} - Q_{(l_1)} \geq 1/(h-1)$ 的值为 $0.227 > 0.05$ ，满足最优方案判断条件。通过式 (9) 计算 21 个方案色彩意象的得分， d_{25} 分数也为最高，进一步验证了该配色方案为最终优选方案。

3.4 对比验证

邀请另外的 15 位被试者（包含 5 位工业设计研究生和 10 位装载机驾驶员），对常见的工程黄配色方案（除行走结构和驾驶室为黑色外，其他具有视觉冲击部分均为黄色）和 d_{25} 配色方案以五个因子为指标采用 10 分制进行打分，以式 (9) 计算色彩意象得分。工程黄的 (R, G, B) 数值使用具有代表性的卡特彼勒公司标志色 (255, 197, 0)，为排除造型因素对评分的干扰，将工程黄配色通过图 2 建立的模型渲染表现见图 7。



图 7 对比测试
Fig.7 Comparison test

结果如表 7 所示， d_{25} 配色方案评分显著高于传统的工程黄配色方案，表明文中所提出的研究方法，有助于挖掘用户潜在色彩意象感知，所得出的配色方案更符合用户需求。最优方案的评价结果也减少了多

表 7 对比测试评分结果
Tab.7 Comparison test score results

方案	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5	得分
a	4.200	3.133	3.067	4.400	4.067	3.750
b	6.667	7.467	7.333	7.533	6.800	7.097

方案评价时指标赋权过程的不确定性,使得决策更加合理。

4 结论

因子分析-熵权法实现了在配色设计中将用户内隐模糊的设计需求提取降维并定量描述,结合等间距序列参数取色法与基于色相距离理论建立的配色原则,有助于准确地获取备选方案群中各配色方案主辅色的 RGB 参数值。评价指标综合赋权后的 VIKOR 法,解决了初始计算中权重值不明确问题,在多评价指标的备选配色方案群决策时,提升了优选结果的合理性和客观性,同时也保持了设计与评价过程的原则一致性,使得排序第一方案最接近理想解,并在品牌识别性、形式美法则,以及整体色彩形象在使用场域中对人群的心理影响等方面,更符合产品的功能和市场定位。后续工作将聚焦于选择使用合适的群体寻优算法对附色面积比例数值做优化,以获得符合设计目标要求的最优附色面积比例。

参考文献:

- [1] 王毅. 产品色彩设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
WANG Yi. Product Color Design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [2] 张宗登, 张红颖. 基于色彩意象的工程装备产品外观配色设计研究[J]. 图学学报, 2016, 37(5): 681-687.
ZHANG Zong-deng, ZHANG Hong-ying. Research of Coating Design of Construction Machinery Based on Color Image[J]. Journal of Graphics, 2016, 37(5): 681-687.
- [3] 张琳, 赵静. 产品色彩设计意象评价的数理方法研究[J]. 机械设计, 2014, 31(12): 108-111.
ZHANG Lin, ZHAO Jing. Mathematical Method Study on Image Evaluation of Product Color Design[J]. Journal of Machine Design, 2014, 31(12): 108-111.
- [4] 杨延璞, 陈登凯, 顾蓉, 等. 基于色彩案例和灰度关联分析的产品配色设计方法[J]. 图学学报, 2016, 37(4): 509-513.
YANG Yan-pu, CHEN Deng-kai, GU Rong, et al. Product Color Design Method Based on Color Case and Grey Relational Analysis[J]. Journal of Graphics, 2016, 37(4): 509-513.
- [5] 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.
- [6] 尚凯, 陈哲, 常能, 等. 基于熵权—VIKOR 法的椅类家具舒适性设计评价[J]. 包装工程, 2021, 42(14): 206-211.
SHANG Kai, CHEN Zhe, CHANG Neng, et al. Evaluation of Chair Furniture Comfort Design Based on Entropy Weight-VIKOR Method[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(14): 206-211.
- [7] 王志愿, 闫磊磊, 邓迎寅, 等. 基于熵权与 VIKOR 方法的设计方案评价与优选[J]. 机械设计, 2022, 39(2): 154-160.
WANG Zhi-yuan, YAN Lei-lei, DENG Ying-yin, et al. Evaluation and Optimization of Design Schemes Based on Entropy Weight and VIKOR Method[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(2): 154-160.
- [8] 张文彤, 董伟. SPSS 统计分析高级教程[M]. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2018: 244-255.
ZHANG Wen-tong, DONG Wei. Advanced Course of SPSS Statistical Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2018: 244-255.
- [9] 张继国, SINGH V P. 信息熵: 理论与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 79-81.
ZHANG Ji-guo, SINGH V P. Information Entropy: Theory and Applications[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2012: 79-81.
- [10] 郭晓晶, 何倩, 张冬梅, 等. 综合运用主客观方法确定科技评价指标权重[J]. 科技管理研究, 2012, 32(20): 64-67.
GUO Xiao-jing, HE Qian, ZHANG Dong-mei, et al. Application of Subjective and Objective Methods in Weights Determination of Synthetic Evaluation of Science and Technology[J]. Science and Technology Management Research, 2012, 32(20): 64-67.
- [11] OPRICOVIC S. Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems[J]. Faculty of Civil Engineering, 1998, 2(1): 5-21.
- [12] OPRICOVIC S, TZENG G H. Multicriteria Planning of Post-earthquake Sustainable Reconstruction[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2002, 17(3): 211-220.
- [13] 潘亚虹, 耿秀丽. 一种基于 VIKOR 的混合多属性群决策方法[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(1): 177-182.
PAN Ya-hong, GENG Xiu-li. A Hybrid Multiple Attributes Group Decision Making Method Based on VIKOR[J]. Machine Design & Research, 2018, 34(1): 177-182.
- [14] HSIAO S W, TSAI H C. Use of Gray System Theory in Product-color Planning[J]. Color Research & Application, 2004, 29(3): 222-231.
- [15] 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.
ZHONG Li-cheng. On Computer Aided Design of Product Emotion Color Matching and Its Evaluation Method[J]. Journal of Graphics, 2018, 39(4): 623-628.
- [16] 侯艳红. 色彩信息的心理语义特征及“隐性”色彩信息对情绪和认知的影响研究[D]. 西安: 第四军医大学,

2007.
HOU Yan-hong. Psychosemantic Characteristics of Color Information and the Influence of 'mplicit' Color Information on Emotion and Cognition[D]. Xi'an: Fourth Military Medical University, 2007.
- [17] 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 of Tank Vehicle Colour Matching and Evaluation Method Based on BP Neural Network[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(1): 118-123.
- [18] GORDON T J, HELMER O. Report on a Long-range Forecasting Study[R]. 1964.
- [19] DELBECQ A L, VAN DE VEN A H. A Group Process Model for Problem Identification and Program Planning[J]. The Journal of Applied Behavioral Science, 1971, 7(4): 466-492.
- [20] 朝仓直巳. 艺术-设计的色彩构成[M]. 修订本. 南京: 江苏凤凰技术出版社, 2018: 54-72.
ASAKURA N. Color Composition of Art and Design[M]. revised edition. Nanjing: Jiangsu Phoenix Technology Press, 2018: 54-72.
- [21] 王震亚. 基于感性工学的装载机人机系统设计研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
WANG Zhen-ya. Research on the Design of Loader Man-machine System Based on Perceptual Engineering [D]. Jinan: Shandong University, 2011.

责任编辑: 蓝英侨

(上接第34页)

- [9] 兰永霞, 胡华鑫. 基于Jack的高速列车司机室人机工程仿真[J]. 机械工程师, 2019(5): 106-108.
LAN Yong-xia, HU Hua-xin. Ergonomic Simulation of Driver's Cab of High-speed Train Based on Jack[J]. Mechanical Engineer, 2019(5): 106-108.
- [10] 谢全一, 张岩. 人体工程学与高铁卧铺设计[J]. 现代制造技术与装备, 2016(6): 18-20.
XIE Quan-yi, ZHANG Yan. Ergonomics and High-speed Rail Sleeper Design[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2016 (6): 18-20.
- [11] 徐平, 章勇, 徐伯初, 等. Jack虚拟技术在列车卧铺爬梯设计中的应用研究[J]. 机械设计, 2013, 30(20): 104-107.
XU Ping, ZHANG Yong, XU Bo-chu, et al. Application of Jack Virtual Technology in Train Sleeper Ladder Design[J]. Mechanical Design, 2013, 30(20): 104-107.
- [12] GB/T 16887—2008, 卧铺客车结构安全要求[S].
GB/T 16887—2008, Structural Safety Requirements for Sleeper Buses[S].
- [13] 张雯, 孟婕. 数字水印技术在印刷防伪领域应用的研究进展[J]. 包装工程, 2017, 38(15): 143-148.
ZHANG Wen, MENG Jie. Progress of Applying Digital Watermarking Technology in Printing Anti-counterfeiting[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(15): 143-148.
- [14] HU F, SATO K, ZHANG X. Semiotics Basis for Designing Product Architecture. 19th-International Conference on Engineering Design[C]// Design Society, Korea: IEEE, 2021, 159-168.
- [15] 胡飞, 沈希鹏, 王兴宇, 等. 基于SAPAD的整体橱柜设计研究[J]. 南京艺术学院学报: 美术与设计版, 2015(5): 188-192.
HU Fei, SHEN Xi-peng, WANG Xing-yu, et al. Research on Overall Cabinet Design Based on SAPAD[J]. Journal of Nanjing University of the Arts : Art and Design, 2015 (5): 188-192.
- [16] GB/T 12985—91, 在产品设计中应用人体尺寸百分位数的通则[S].
GB/T 12985—91, Apply the General Rule of Human Size Percentiles in Product Design[S].
- [17] GB/T 10000—1988, 中国成年人人体尺寸[S].
GB/T 10000—1988, Human Dimensions of Chinese Adults[S].

责任编辑: 蓝英侨