

基于感性意象和 BP 神经网络的产品 CMF 决策模型研究

孙利, 张硕, 覃忠志, 吴俭涛, 李江南, 李满坡
(燕山大学, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: **目的** 为实现特定感性意象下的产品 CMF 精准选定与量化, 结合 BP 神经网络和线性回归提出一种产品 CMF 决策模型。**方法** 通过文本挖掘形式确定用户感性意象, 根据 HSV 色彩模型与选定的康复辅具的材质与工艺构建 CMF 要素空间, 并基于设计要素空间形成海量 CMF 方案, 同时根据选定感性意象对方案加以评价, 获得感性意象与 CMF 单一设计要素的定性映射关系。将 CMF 方案编码后与感性意象评价价值结合, 并通过 BP 神经网络以定量方式构建 CMF 决策模型, 筛选出最优色彩区间、材质及工艺。对选中色彩区间再次细分出设计方案并进行评价, 通过线性回归得到色彩回归方程, 从而构建产品 CMF 的综合决策模型。**结果** 以膝关节支具为例进行实例研究, 通过 BP 神经网络构建的一阶 CMF 决策模型预测值与期望值的均方误差 MSE 为 0.038 13, 且预测结果与定性映射关系基本一致, 表明该阶模型可信度较高且精度良好。利用线性回归构建的二阶决策模型 P 值小于 0.01, 表明 H 、 S 、 V 的数值与感性意象评价价值具有显著相关性, 证明了该 CMF 决策模型的可行性。**结论** 构建的 CMF 决策模型在产品领域具有一定的通用性, 能够有效实现康复产品 CMF 的精准选择与量化, 在定性和定量层面指导康复产品 CMF 决策的优选和创新。

关键词: 产品设计; 康复辅具; 感性意象; CMF 决策模型; BP 神经网络

中图分类号: TB472 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)12-0151-14

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.12.016

Product CMF Decision Model Based on Perceptual Image and BP Neural Network

SUN Li, ZHANG Shuo, QIN Zhong-zhi, WU Jian-tao, LI Jiang-nan, LI Man-po
(Yanshan University, Hebei Qinhuangdao 066004, China)

ABSTRACT: The work aims to develop a product CMF decision model by integrating BP neural network and linear regression in order to accomplish accurate selection and quantification of product CMF under certain perceptual images. Through text mining, the user's perceptual image was identified, a CMF element space was created according to the HSV color model and the material and process of chosen rehabilitation aids, a large number of CMF solutions based on the design element space were formed, and the solutions were assessed in accordance with the chosen perceptual image to obtain a qualitative mapping relationship between the perceptual image and a single design element of CMF. The CMF solutions were coded and integrated with the perceptual image evaluation value and the CMF decision model was established by quantitative method through BP neural network to identify the best color space, material and method. The chosen color intervals were separated into design solutions and evaluated. The color regression equation was then created by linear regression, and the CMF decision model was quantitatively built by BP neural network. With knee brace as an example, the case study was carried out, the first-order CMF decision model developed by BP neural network had an MSE of 0.038 13 between the predicted and expected values, and the prediction results were essentially consistent with the qualitative

收稿日期: 2023-01-13

基金项目: 国家社科基金艺术学项目 (22BG125)

作者简介: 孙利 (1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为康复辅具创新设计、智能数字化设计理论与方法。

通信作者: 张硕 (1992—), 女, 博士生, 主攻康复辅具产品设计、产品智能设计方法。

mapping relationship, demonstrating the high accuracy and reliability of this order of the model. The values of H , S , and V were highly associated with the perceptual image assessment value, as shown by the second-order decision model's p-value of less than 0.01, which demonstrated the viability of the CMF decision model. The developed CMF decision model has some versatility in the area of product design and is capable of realizing correct CMF selection and quantification for rehabilitation items as well as directing preferential CMF decision and innovation at both the qualitative and quantitative levels.

KEY WORDS: product design; rehabilitation aids; perceptual image; CMF decision model; BP neural network

随着我国对康复类医疗体系的建设和管理不断加强,康复辅具产品已逐步扩展到普通疾病及亚健康状态的康复进程中,越来越多的用户成为康复辅具的受众群体。然而,目前用户对康复产品的需求与供给之间存在结构性差异^[1],逐渐从刚性需求升级到感性需求^[2],特别是使用频率较高的穿戴式康复辅具,除功能需求外,产品呈现的感性意象也逐渐成为用户购买决策的重点。目前大多研究着眼于康复辅具的产品形态与感性意象的关系架构,而CMF作为用户对产品感性意象形成的直观要素,对用户的购买决策同样起着关键作用。因此,聚焦康复辅具的CMF感性意象设计,实现特定感性意象下的产品CMF精准选择与量化,是康复类产品亟待研究的设计方向。

目前,从感性意象角度对康复辅具类产品展开CMF分析的研究较少,为了充分探寻感性意象与CMF设计要素的关系,充分分析了以二者为研究对象的文献报道。汪颖等^[3]以地板样本为例,通过构建基因表达式编程的材料质感偏好意象进化认知算法,旨在从产品材质设计角度提升产品差异性和用户满意度。王园园等^[4]为提升机械产品涂装设计效率,建立了“视觉意象-质感参数”模型,对涂装质感粗糙度、折射指数和厚度与感性意象的关系进行了量化。苏建宁等^[5]以汽车车身为例,对色彩、材料、工艺之间的耦合设计特性及其认知肌理进行了研究,用以提高用户满意度。杨冬梅等^[6]以产品色彩、材质和环境光等变量对老年人的认知影响为研究对象,采用熵值法、CRITIC等方法构建了产品设计变量与感性意象映射模型,并采用Java开发了康复辅助产品设计评价系统。孙新竹^[7]利用卡诺模型对消费电子产品CMF进行了研究,建立了基于感性工学的电视机产品CMF基础样本库,为后续同类产品CMF设计提供了参考。

上述研究从感性意象角度对产品CMF进行了模型构建与设计应用,对后续从感性意象角度分析CMF设计具有借鉴和指导意义,但仍存一定局限:第一,部分研究虽以定量分析的方式对CMF三要素即色彩、材质和工艺进行分析,但研究结果大多为定性类型,如色彩方面只能得到红色、棕色、银色的模糊色彩,无法获取如RGB、CMYK等具体的色彩数值。而部分研究虽能够得到定量的设计参数,但大多以材质质感这一要素进行研究,无法得到色彩、材质和工艺等完整CMF要素的综合设计指导。第二,在

感性意象收集阶段,现有研究大多采用问卷调查或文献查阅等形式,存在样本量小、数据更新不及时等问题,而感性意象收集的不精确将直接影响后续研究的严谨度,因此,感性意象调研的精准度问题也亟待解决。

本研究以康复产品膝关节支具为例,采用文本挖掘方法调研用户对产品的真实评价,从而精准构建感性意象空间。在此基础上,结合感性意象词汇对设计方案进行分析,获取感性意象与CMF设计要素之间的定性关系,并通过BP神经网络和线性回归方程构建产品CMF设计要素与感性意象评价间的决策模型,从而实现特性感性意象下的产品CMF设计要素精准选择与量化,为后续康复辅具的CMF决策提供参考。

1 理论基础

1.1 文本挖掘

文本挖掘又称为文本数据挖掘,其目的在于从大量文本中提取不同意见、情感或观点,并对提取的知识进行组织分类,从而精准获取用户需求^[8]。在产品设计的感性意象研究领域中,以往获取用户感性意象的形式主要为结构化问卷、用户访谈等,存在样本量小、人工干预度高、调研数据不准确等问题^[9],而以文本挖掘形式对产品感性意象进行挖掘能够显著提升感性意象获取的精准度和效率。通过爬取用户在网络端对产品的评价文本进行数据分析,如对语料进行词性筛选,以出现频次较高的形容词语料作为产品感性意象集合,即可准确且高效地完成对感性意象的构建。

1.2 BP神经网络

BP神经网络模型是一种多层前馈神经网络,可通过学习海量的输入和输出数据,形成二者之间的映射关系模型^[10]。BP神经网络对线性和非线性的数据集均适用,通过对数据集的学习实现未知方案数据的精准预测^[11]。目前BP神经网络在产品设计领域中被广泛应用于预测创新方案的评价值,且多与感性意象相结合,从而筛选出符合用户感性意象需求的产品方案,帮助企业 and 设计师将产品的用户感性评价前置到设计阶段,实现降低市场风险与提升产品竞争力的目的^[12]。

1.3 HSV 色彩模型分析

HSV 是一种面向视觉感知的色彩空间, 包括色调 (Hue)、饱和度 (Saturation)、明度 (Value) 3 个元素, 其模型形态为圆锥形, 3 个元素分别位于圆锥的 3 个维度。其中, 色调 (Hue) 取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$, 饱和度 (Saturation) 和明度 (Value) 取值范围为 $0\% \sim 100\%$ 。与 RGB 色彩相比, HSV 色彩模型的 3 个变量彼此间相关性较低, 且更符合人对色彩的主观认知, 因此在模型构建阶段使用 HSV 色彩模型更便于理解与操作^[13]。

相较于 RGB, 采用 HSV 色彩模型计算更便于设计师和用户更好地理解数值变化对色彩的影响, RGB 色彩模型中 R 、 G 、 B 数值与色彩属性无必然联系, 但 RGB 色彩在工业设计等领域应用较为广泛。故在应用 HSV 色彩模型并计算出该方案对应的色相、饱和度和纯度的相关数据后, 可通过公式将其转化为 RGB 数值, 既保证了模型生成过程各利益相关者的理解, 同时也保证了后期色彩赋值的统一。HSV 色彩空间转化为 RGB 色彩空间的公式见式 (1) — (5)^[14]。HSV 各个维度值范围: $0 \leq H \leq 360$, $0 \leq S \leq 1$, $0 \leq V \leq 1$ 。

$$Q = V \times S \quad (1)$$

$$P = Q \times \left(1 - \left\lfloor \left(\frac{H}{60} \right) \bmod 2 - 1 \right\rfloor \right) \quad (2)$$

$$m = V - Q$$

$$(R', G', B') = \begin{cases} (Q, P, 0), & 0 \leq H < 60 \\ (P, Q, 0), & 60 \leq H < 120 \\ (0, Q, P), & 120 \leq H < 180 \\ (0, P, Q), & 180 \leq H < 240 \\ (P, 0, Q), & 240 \leq H < 300 \\ (Q, 0, P), & 300 \leq H \leq 360 \end{cases} \quad (3)$$

$$(R, G, B) = ((R' + m) \times 255, (G' + m) \times 255, (B' + m) \times 255) \quad (4)$$

式中: H 为色调值; S 为饱和值; V 为明度值。

2 产品 CMF 决策模型构建

整体研究流程主要分为 4 个模块, 分别是感性意象词汇的获取、CMF 设计要素空间的构建、代表性设计方案的感性评价及 CMF 决策模型的构建, 模型构建流程如图 1 所示。

首先通过文本挖掘方式对研究对象进行用户评论爬取, 并通过词性标注等形式构建产品感性意象词集合。随后对研究对象进行分析, 构建 CMF 设计要素空间, 获取色彩、材质和工艺的完整分类。根据构建的 CMF 设计要素空间可排列组合成多种方案, 采用正交设计法筛选代表性方案 64 个, 对这 64 个方案进行色彩模糊分类以及材质和工艺的精准分类, 结合感性词汇, 采用控制变量法对产品的单一 CMF 设计要素进行用户感性评价, 从而获取各项感性词汇与

CMF 设计要素关系矩阵, 以此获得二者间的定性关系。同时, 对 64 个方案赋予完整的 CMF 设计要素以供用户对整体方案进行感性评价, 评价后的分值作为 BP 神经网络的输出层数据, 将 64 个方案结合 CMF 设计要素空间进行编码并作为输入层数据。经过 BP 神经网络映射得到初期最优方案解, 其中材料和工艺为唯一解, 而色彩为区间解。为了进一步获取色彩的精确数值, 对获得的区间再次细分色彩区间, 并通过正交设计获取新方案集合, 同时进行感性评价。通过分析方案 HSV 数值与感性评价值, 进一步构建二者的线性回归模型, 以此求得色彩的唯一最优解, 同时结合 BP 神经网络求得材质和工艺的解, 实现产品最优方案的获取。

3 实例研究

以康复辅具膝关节支具为例, 对基于 BP 神经网络的 CMF 决策模型进行验证。现某康复辅具企业一款膝关节支具造型已定, 希望通过定量方式准确测量用户的感性评价, 并以此来指导 CMF 设计方案。以该产品为研究对象, 通过产品 CMF 决策模型构建 CMF 与感性意象之间的映射关系, 从而精准计算产品色彩数值与材料和工艺的具体方案。为了降低产品造型方案对 CMF 的决策影响, 产品造型方案以白形式展示, 如图 2 所示。

3.1 感性意象词汇挖掘

为准确构建膝关节支具感性意象词汇集合, 采用文本挖掘形式对同类产品的用户评价进行收集。以京东商城销量前五的膝关节支具为例进行用户评价爬取, 爬取工具采用八爪鱼采集器, 共收集评论 3 873 条, 去除重复评论后获得有效评论 3 815 条。随后采用 NLP-ICTCLAS 汉语分词系统对文本进行词性标注^[15], 标注为 a 的词汇词性为形容词, 即感性意象词所属词性。通过筛选文本中所有形容词并剔除非具体感性词汇, 如“好”和“不错”等, 最终摘取词频最高的前六位感性意象词并匹配其反义词形成感性意象词对集合, 如表 1 所示。

通过文本挖掘收集的膝关节支具的感性意象词汇作为后续产品 CMF 方案评价的感性意象基础。

3.2 CMF 要素空间建立

CMF 中的色彩部分以 HSV 色彩模型为基准, 在此基础上进行色彩空间要素的划分。图 3 所示为 HSV 色彩模型三维度的拆解, 色调 (Hue) 将颜色划分为圆环形式, 取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$; 饱和度和明度的取值范围为 $0\% \sim 100\%$, 鉴于色彩数值可取无穷尽, 故将色调、饱和度和明度进行区间划分。通过 BP 神经网络构建 CMF 决策模型, 能够确定特定感性意象对应的用户偏好的色彩区间, 再针对特性色彩区间进一步确定具体色彩数值。其中, 按照认知中常见的色彩

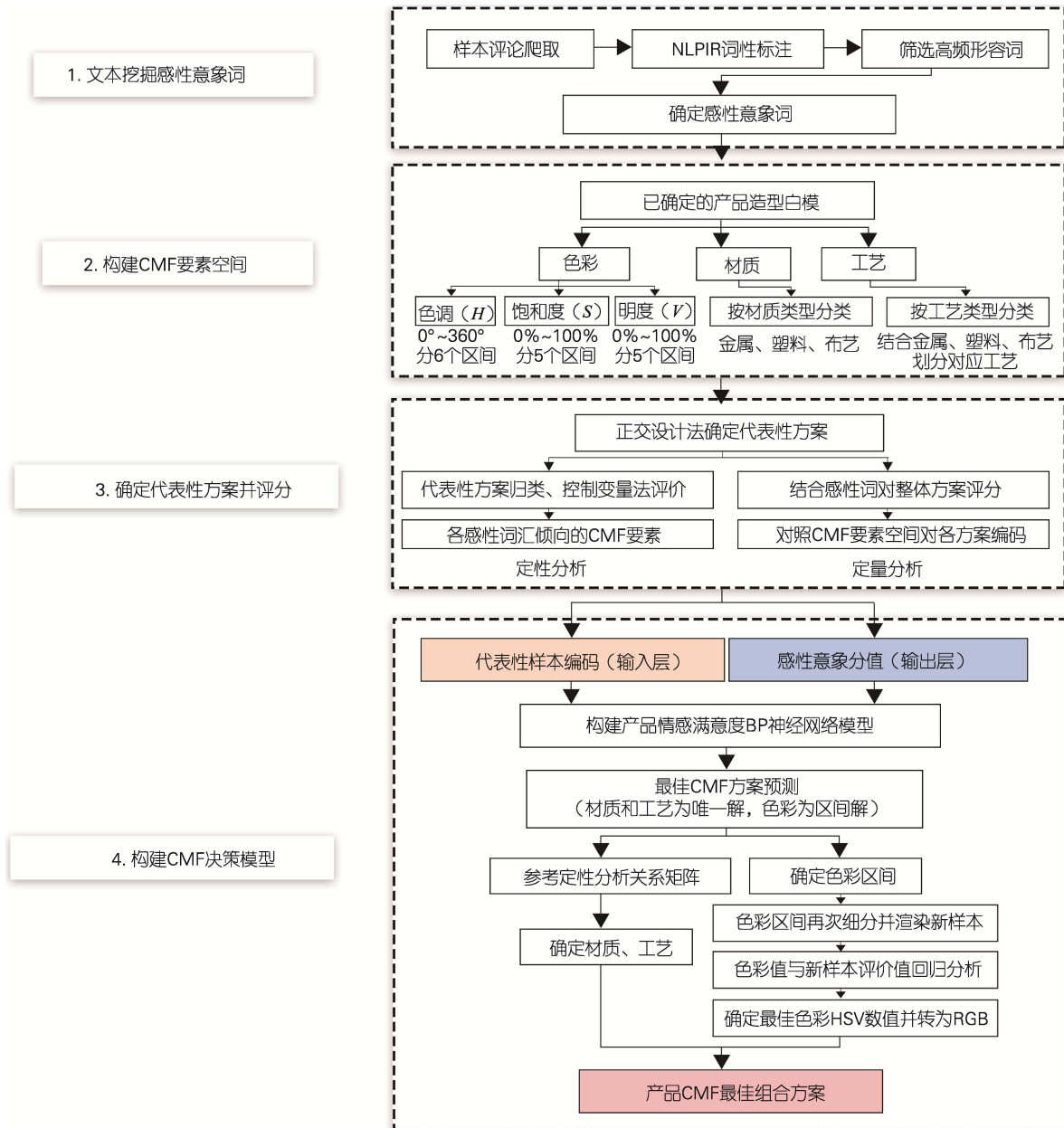


图1 产品CMF决策模型构建流程

Fig.1 Process of constructing product CMF decision model



图2 膝关节支具白模

Fig.2 White mold of the knee brace

表1 膝关节支具评论数据感性意象词对
Tab.1 Perceptual image vocabulary in review data of knee brace

序号	感性意象词对	序号	感性意象词对
1	舒适的-难受的	4	精致的-粗糙的
2	轻盈的-笨重的	5	透气的-闷热的
3	结实的-单薄的	6	灵活的-拘束的

将色调部分等分为6个区间,每个区间对应一种常见色。而饱和度和明度方面,考虑到区间划分结果取整、区间数量对方案个数的影响等多重因素,二者各划分为5个区间。

对产品设计领域而言,材质和工艺种类繁多,不同类型的产品在材质与工艺上千差万别。为了更有针

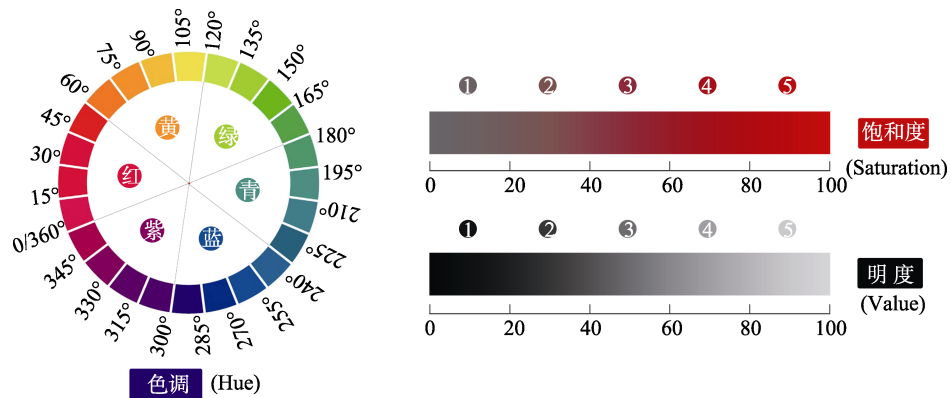


图 3 基于 HSV 的色彩要素空间
Fig.3 Color element space based on HSV

对性地构建膝关节支具产品的 CMF 决策模型, 对膝关节支具进行了详细的市场调研, 发现该类产品基本上包含 3 种材质类型, 分别是 A 部分—金属或类金属、B 部分—塑料和 C 部分—布艺。其中, 垂直支架部分采用金属材料, 环形固定支架和调节卡盘采用塑料材质, 柔性绑带部分采用布艺材质。

通过调研收集到的膝关节支具材质和工艺要素空间如表 2 所示, 并按照金属/类金属、塑料和布艺进行归类划分。每种类别对应的材质和工艺分别为 3 种类型, 共包含 9 种材质和 9 项工艺。为了排除色彩对材质和工艺的影响, 表 2 所示材质和工艺均采用无彩色渲染形式。

对膝关节支具的 CMF 色彩、材质和工艺建立要

素空间后, 需确定影响因子数目以便后续 BP 神经网络编码。如表 3 所示, 其中色彩、材质和工艺分别按照膝关节支具结构划分为金属部分、塑料部分和布艺部分, 色彩空间中 3 个部分共对应 9 项 H、S、V 要素, 即 9 项因子, 材质和工艺空间中 3 个部分共对应 6 项因子, 故 CMF 要素空间中共包含 15 项因子。

每项因子下包含多个空间要素, 如色彩空间中金属类的色调 H, 该色调空间下对应 6 个细分空间, 如图 3 所示, 同理, 色彩空间中其他类对应的细分空间以及材质空间和工艺空间也对应多种细分空间, 对细分空间进行排列组合可生成上万种方案, 难以使用户一一进行感性意象评价, 故后续采用正交设计法进行代表性方案筛选。

表 2 膝关节支具材质和工艺要素空间
Tab.2 Material and craft element space of knee brace

类别	材质			工艺		
金属/类金属	1. 铝合金 	2. 钢 	3. 碳纤维 	1. 拉丝 	2. 喷砂 	3. 电镀
塑料	1. ABS 	2. 亚克力 	3. 硬性软胶 	1. 磨砂 	2. 金属漆 	3. 抛光
布艺	1. 皮革 	2. 科技布 	3. 透气棉 	1. 孔洞 	2. 编织 	3. 镭射

表 3 膝关节支具 CMF 要素空间对应因子
Tab.3 Factors corresponding to the CMF element space of the knee brace

色彩 (Color)			材质 (Material)			工艺 (Finishing)								
A 部分 金属类			B 部分 塑料类			C 部分 布艺类			A 部分 金属类	B 部分 塑料类	C 部分 布艺类			
H	S	V	H	S	V	H	S	V	因子 10	因子 11	因子 12	因子 13	因子 14	因子 15
因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6	因子 7	因子 8	因子 9	因子 10	因子 11	因子 12	因子 13	因子 14	因子 15

3.3 CMF 方案感性评价

通过结合收集到的感性词汇对 CMF 设计要素进行评价, 主要从两个维度进行。首先, 采用控制变量法对单一的 CMF 设计要素进行评价, 获得单一的设计要素与感性意象的匹配程度, 如金属材质领域何种材质与“轻盈的”感性意象词汇关系紧密度最高, 从而获得 CMF 设计要素与感性意象词汇之间的关系矩阵, 为后续的 CMF 决策提供定性参考依据。其次, 对膝关节支具的整体 CMF 搭配方案进行感性评价, 获取产品应用各 CMF 设计要素后的综合感性评价, 并以此获得各方案的感性评价, 作为后续定量研究的基础。在感性评价前首先需要确定评价对象即膝关节支具产品的 CMF 设计方案, 根据前文 CMF 色彩空间的构建可知, 通过排列组合可产生上万种组合方案, 为了便于

调研, 此处采用正交设计法筛选代表性 CMF 设计方案。

3.3.1 正交设计法筛选代表性方案

鉴于 CMF 要素空间中因子数过多, 故将色彩、材质及工艺部分分别进行正交设计, 最终形成 64 个代表性方案组合, 如表 4 所示。正交设计的两要素分别是因子与水平, 以因子 1 为例, 该因子为色彩区间中金属部分的色调 (Hue) 要素, 如图 3 中色相环所示, 该要素共划分为 6 个区间, 即共包含 6 个水平, 而各水平需要取具体数值而非区间, 因此各水平数值以各区间中间值为准, 从而保证后续方案的具体赋值。例如, 方案 1 对应的因子 1 水平为色调中的第 5 区间, 取值范围为 240°~300°, 故取其区间中间值 (即 270°)。同理, 将其他各方案对应的因子根据正交方案赋值后, 即可进行各方案的 CMF 效果呈现。

表 4 64 个膝关节支具方案的因子及对应水平
Tab.4 Factors and corresponding levels of 64 solutions of knee brace

序号	色彩 (Color)									材质 (Material)			工艺 (Finishing)		
	A 部分金属类			B 部分塑料类			C 部分布艺类			A 部分	B 部分	C 部分	A 部分	B 部分	C 部分
	H	S	V	H	S	V	H	S	V	金属类	塑料类	布艺类	金属类	塑料类	布艺类
	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6	因子 7	因子 8	因子 9	因子 10	因子 11	因子 12	因子 13	因子 14	因子 15
1	270°	50%	10%	150°	30%	10%	210°	30%	10%	铝合金	ABS	皮革	拉丝	磨砂	孔洞
2	210°	50%	30%	270°	90%	30%	30°	10%	10%	铝合金	亚克力	透气棉	拉丝	金属漆	镭射
3	150°	90%	10%	150°	30%	70%	330°	30%	10%	铝合金	硬性软胶	科技布	拉丝	抛光	编织
4	30°	50%	10%	330°	70%	90%	30°	30%	30%	钢	ABS	透气棉	拉丝	金属漆	孔洞
5	270°	10%	10%	270°	70%	10%	90°	50%	30%	钢	亚克力	科技布	拉丝	抛光	镭射
6	30°	10%	30%	90°	50%	10%	210°	30%	90%	钢	硬性软胶	皮革	拉丝	磨砂	编织
7	90°	10%	10%	90°	30%	90%	30°	70%	50%	碳纤维	ABS	科技布	拉丝	抛光	孔洞
8	330°	90%	30%	270°	50%	30%	30°	70%	10%	碳纤维	亚克力	皮革	拉丝	磨砂	镭射
9	270°	10%	30%	330°	30%	10%	150°	10%	70%	碳纤维	硬性软胶	透气棉	拉丝	金属漆	编织
10	90°	50%	10%	90°	10%	30%	270°	10%	70%	铝合金	ABS	皮革	喷砂	磨砂	镭射
11	330°	50%	70%	30°	30%	10%	90°	10%	90%	铝合金	亚克力	透气棉	喷砂	金属漆	编织
12	90°	30%	10%	150°	50%	10%	30°	90%	70%	铝合金	硬性软胶	科技布	喷砂	抛光	孔洞
13	150°	10%	90%	30°	10%	30%	30°	30%	70%	钢	ABS	透气棉	喷砂	金属漆	镭射
...															
64	90°	90%	50%	330°	90	70	90°	10	10	铝合金	ABS	皮革	电镀	抛光	孔洞

3.3.2 单一 CMF 设计要素感性评价

为了初步探究感性意象词汇与 CMF 各单一要素之间的联系, 采用控制变量法及主观评价的形式对其进行调研。鉴于色彩的丰富多样性, 前期采用归类形式将上述 64 个方案对应的色彩分为六大类别, 分别是黄棕色、灰紫色、草绿色、深青色、深红色、深蓝色、深枪色、银灰色, 材质和工艺对应表 2 进行分类。调研人群有 16 人, 均为从事康养辅具产品研究的设计人员, 问卷题目共设置 42 项图文结合的多选题。调研问卷的设置主要分为三大模块, 设置标准是以膝关节支具各部件的材质宏观类别进行划分, 分别为金

属类、塑料类、布艺类。每个模块包含 3 个小模块, 分别从色彩、材质和工艺 3 个维度进行划分。问卷各题配图分别对产品进行单一 CMF 设计要素赋予, 即被调研的模块赋予选定设计要素, 其他部分以灰度形式展示, 从而降低其他要素的干扰。CMF 设计要素中色彩要素较易于辨别, 而材质和工艺要素需要被试者细致观察, 为了保障调研的精准度, 在问卷调研过程中要求用户以台式电脑进行作答, 以保证对各样本的 CMF 充分感知并选择出接近真实感受的感性词汇。膝关节支具材质和工艺部分的调研结果如图 4、图 5 所示, 框选部分为被试者进行感性评价的产品区

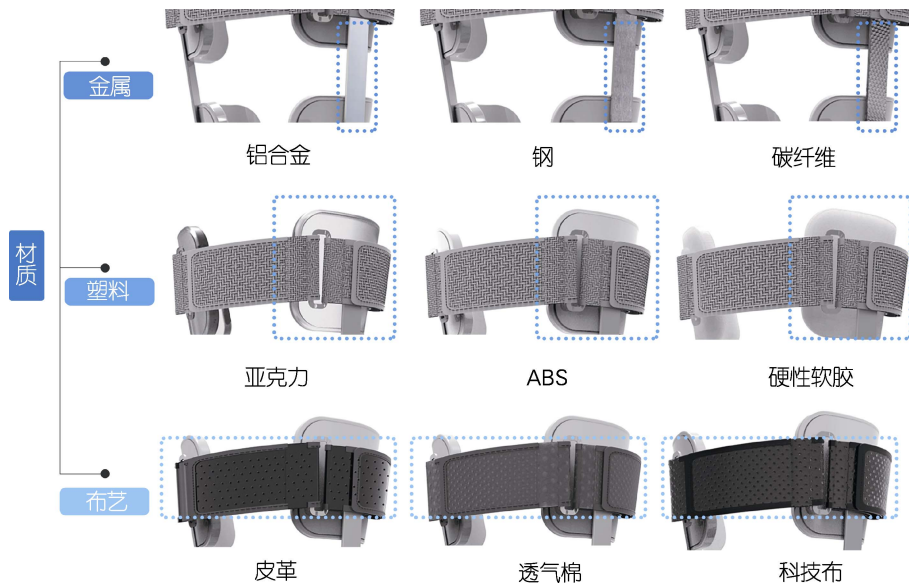


图 4 膝关节支具产品材质对比
Fig.4 Comparison of knee brace product material

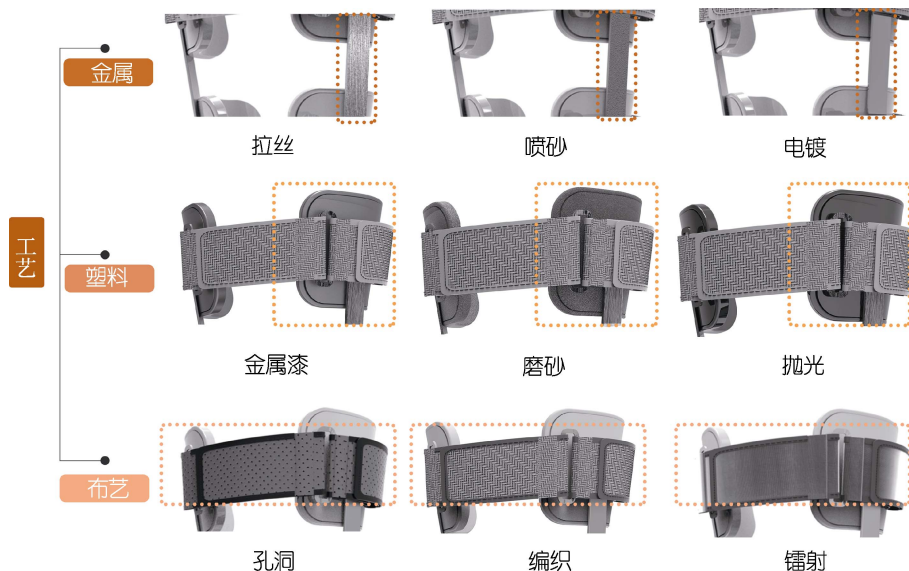


图 5 膝关节支具产品工艺对比
Fig.5 Comparison of knee brace product process

域, 此处对膝关节支具进行了截取, 仅展示部分差异性区域。

通过对膝关节支具 CMF 单一设计要素的初步用户调研, 可以获取用户对各感性意象词汇及各项 CMF 设计要素的关联度, 如图 6 所示。其中, 矩阵交叉的数字代表被试的选中数次, 不同色彩代表选中次数的高低程度, 颜色由浅至深分别代表 20% 以下、20%~40%、40%~60%、60%~80%、80% 以上。

鉴于 CMF 设计要素与感性词汇并非独立的一一对应关系, 同一种设计要素可能会对应多种感性意象, 因此在调研过程中设置为多选形式, 被试针对每种设计要素可选择 1~3 种感性词汇。由图 6 的调研结果可知, 感性词汇“结实的”与所构建的 CMF 设计

要素关联紧密度较强, 其中材质“钢”与感性词汇“结实的”关联性极强, 色彩“深枪色”与感性词汇“结实的”的关联性也较为优异, 材质“皮革”、工艺“金属漆”和“镭射”也与感性词汇“结实的”联系性紧密。其次, 在感性词汇“轻盈的”中, ABS 材质表现较好; 在感性词汇“舒适的”中, 材质“硬性软胶”较其他材质有明显优势; 而在感性词汇“透气的”和“灵活的”中, 色彩要素“深红色”“深枪色”“深绿色”、材质要素“金属漆”、工艺要素“电镀”均表现较差, 因此, 在以这两项感性词汇为设计核心时, 应尽量避免采用此类设计要素。

为了更好地构建感性意象词汇与 CMF 设计要素之间的关系, 根据调研结果形成如表 5 所示的映射矩

阵, 该矩阵是结合图 6 中的被试选择频次绘制得到的。通过表 5 形成 CMF 设计要素与感性意象词汇之

间的定性关系, 从而指导后续膝关节支具产品基于特定感性意象的设计要素的选择。

CMF 要素 感性词汇	A部分(金属类)										B部分(塑料类)										C部分(布艺)																					
	色彩					材质		工艺			色彩					材质		工艺			色彩					材质		工艺														
	黄棕色	灰紫色	草绿色	深青色	深蓝色	深枪色	银灰色	铝合金	碳纤维	拉丝	喷砂	电镀	黄棕色	灰紫色	草绿色	深青色	深蓝色	深枪色	银灰色	A S	亚克力	硬性软胶	磨砂	金属漆	抛光	黄棕色	灰紫色	草绿色	深青色	深蓝色	深枪色	银灰色	科技布	透气棉	皮革	孔洞	编织	镭射				
舒适的	6	4	6	3	4	5	4	6	1	3	6	2	6	2	9	6	5	5	4	2	4	4	6	1	12	2	1	2	8	6	9	4	3	3	6	4	4	7	1	5	5	0
轻盈的	5	6	8	5	3	5	5	10	8	2	5	6	1	3	4	6	8	3	2	2	8	12	7	10	1	3	3	3	4	9	5	2	2	2	5	4	5	2	3	4	2	
结实的	8	3	3	8	8	4	13	7	9	15	6	4	7	8	7	0	0	5	8	9	13	7	5	4	5	9	11	8	9	2	0	11	9	11	12	4	7	4	11	5	8	11
精致的	5	5	2	2	6	8	4	7	5	1	6	7	5	9	2	8	3	4	7	8	4	5	2	8	3	8	8	8	2	9	5	3	6	7	3	3	7	4	5	2	3	6
透气的	4	2	7	6	4	4	1	2	0	0	5	4	2	0	1	2	7	5	0	1	0	2	0	6	2	1	0	0	3	1	4	0	1	3	0	7	1	8	2	9	5	1
灵活的	4	8	10	3	1	6	5	6	3	2	1	1	1	0	3	1	4	6	0	2	0	1	2	3	1	1	0	3	2	1	4	0	1	1	0	2	0	1	0	1	1	0

20%以下 20%-40% 40%-60% 60%-80% 80%以上

图 6 感性词汇与单一 CMF 设计要素关联性调研

Fig.6 Research on the relevance of perceptual vocabulary to a single CMF design element

表 5 感性词汇与单一 CMF 设计要素映射矩阵

Tab.5 Mapping matrix of perceptual vocabulary to single CMF design elements

感性词汇	色彩 (Color)	CMF 要素					
		材质 (Material)			工艺 (Finishing)		
		金属	塑料	布艺	金属	塑料	布艺
舒适的	黄棕色/草绿色	碳纤维	硬质软胶	透气棉	喷砂	磨砂	孔洞/编织
轻盈的	银灰色/草绿色	铝合金	ABS	透气棉	拉丝	金属漆/抛光	编织
结实的	深枪色	钢	ABS/硬性软胶	皮革	电镀	金属漆	镭射
精致的	灰紫色/深蓝色	碳纤维	亚克力	科技布	电镀	均良好	镭射
透气的	草绿色	碳纤维	亚克力	透气棉	拉丝	均欠佳	孔洞
灵活的	草绿色/深青色	铝合金	亚克力	透气棉	均欠佳	抛光	孔洞/编织

至此获取到了膝关节支具感性意象词汇及其 CMF 设计要素二者间的定性关系, 得到的结果能够在该类型产品的 CMF 决策过程中起到有效指导作用, 但 CMF 设计要素的精准确定仍需构建量化的决策模型, 以此获取色彩的精准数值、材质和工艺的精准选择。如表 5 中感性词汇“结实的”对应的色彩“深枪色”其具体的 RGB 数值如何计算, 其塑料材质部分应如何确定选择 ABS 或是硬性软胶。因此, 为解决上述问题, 需在定性分析的基础上, 进一步进行 CMF 设计要素的定量测量与模型构建。

3.3.3 CMF 全设计要素综合感性评价

上述对 CMF 单一设计要素的感性评价已获取了其与其感性意象词汇之间的定性关系, 接下来需要对膝关节支具的 CMF 全设计要素进行综合评价, 综合评价对象即为正交设计法得到的 64 项膝关节支具方案。CMF 全设计要素综合评价的目的在于能够构建膝关节支具 CMF 的定量化决策模型, 并结合前文的定性分析确定特定感性词汇的最佳 CMF 设计要素选择。CMF 决策模型采用 BP 神经网络进行构建, 需要获取其输入层和输出层数据。输入层

数据为 64 项方案对照表 3 进行的编码, 输出层数据则为被试对 64 项方案中 CMF 设计要素的整体感性评分。

将 64 个 CMF 设计方案进行效果图呈现, 形成膝关节支具的 CMF 设计方案集合, 如图 7 所示。为正交设计筛选的代表性方案能够保证各因子和水平充分体现, 图 7 中膝关节支具的 64 个 CMF 方案渲染图即作为后续用户感性意象的评价样本。

为了完整展示 64 个方案, 对各方案进行了缩小处理, 故此处只能观察到各方案的色彩差异性。但在实际调研过程中, 被试采用台式电脑进行测试, 各方案的材质和工艺差异性均能完整展现, 如图 8 所示。为了得到 64 个膝关节支具 CMF 方案的感性意象评价价值, 邀请 20 位工业设计方向的教师和学生对方案集合进行感性评价。

以 6 项感性意象词对中“轻盈的-笨重的”为例对 CMF 方案进行评价, 评价指标为 1~5 分, 其中“非常轻盈”对应满分 5 分, “非常笨重”对应 1 分, 中间设置 3 个指标分别是“比较轻盈”“一般”“比较笨重”。为了更好地构建 BP 神经网络, 对数值进行了归一化处理, 评价结果如表 6 所示。

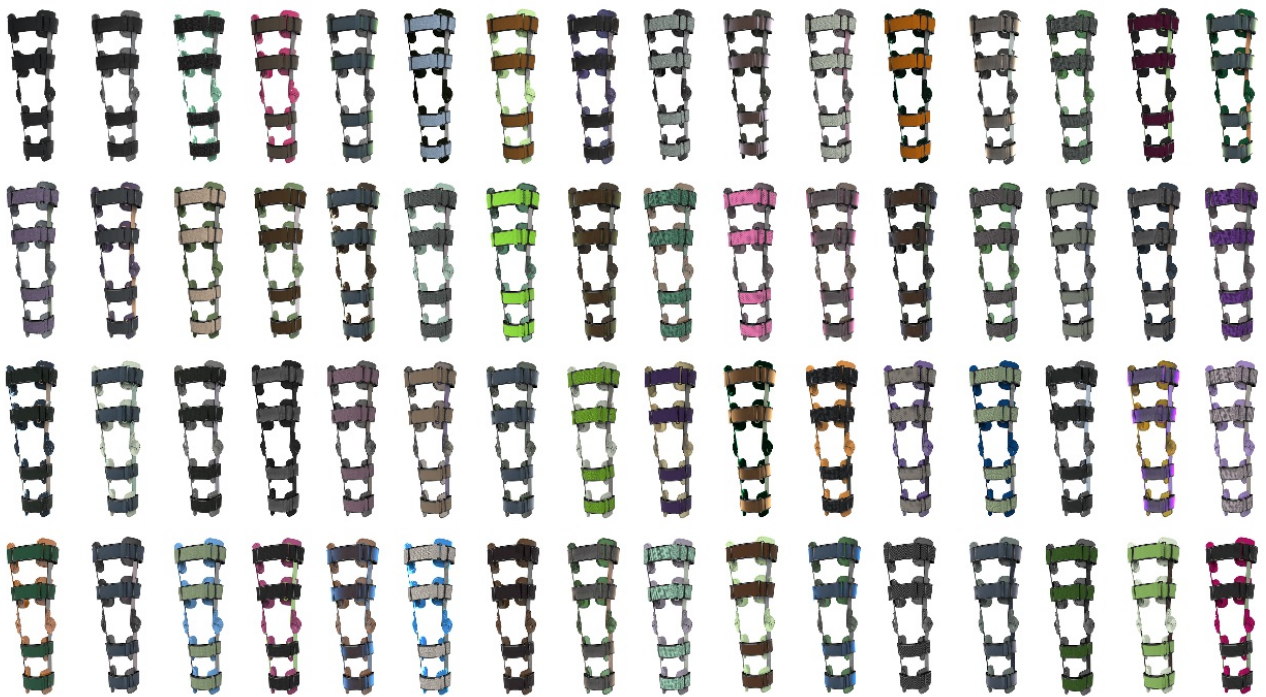


图 7 64 个膝关节支具方案效果图
Fig.7 Renderings of 64 knee brace solutions



图 8 膝关节支具方案效果图放大展示
Fig.8 Enlarged view of the renderings of knee brace solutions

3.4 CMF 决策模型构建

3.4.1 64 个方案 CMF 要素编码

前文已通过正交设计法确定 64 个方案 15 个因子的各水平, 根据各方案不同因子对应的水平进行编码, 64 个方案编码如表 7 所示。以色彩空间中金属类别下的色调即因子 1 为例, 如图 3 所示, 该色调因子共包含 6 个空间, 故该色调因子共含 6 位编码。因子 1 对应色调为 270° , 即为色调 6 个空间中的第 5 空间, 即第 5 位编码为 1, 其余为 0, 故该因子编码为 000010。同理, 其他色彩和材质及工艺空间均可得到对应编码, 即可得 64 个方案对应完整编码, 每个方案编码即为各细分项下的空间数之和, 即 66 位。至此, BP 神经网络的输入层编码和输出层数值已收集完整, 随后即可构建基于感性意象的产品 CMF 的 BP 神经网络模型。

3.4.2 CMF 决策模型构建与方案预测

膝关节支具的 CMF 决策模型由 3 级组成, 分别

是输出层、输出层和隐含层。64 个方案的编码作为输入层数据, 即输入层节点数为 64。用户针对“轻盈的-笨重的”感性意象词的评价值为输出层, 即输出层节点数为 1。而隐含层节点数不固定, 可通过经验公式 (6) 来确定。

$$h \leq \sqrt{n \times (k + 3)} \quad (6)$$

式中: n 为输入层节点, 64; k 为输出层节点, 1; h 为隐含层节点, 经计算其最大值为 16, 以试凑法确定最佳节点数, 当 h 为 8 时, 该 CMF 模型误差相对较小, 故隐含层节点数为 8。

通过 Matlab 创建 BP 神经网络, 以 trainlm 算法对模型进行训练, 学习次数为 2 000 次。为了避免因样本数量限制而导致无法拟合, 采用 K-fold 进行对模型交叉验证, 即总样本量为 r , 随机抽取 $r-1$ 组数据作为训练样本, 剩余 1 组作为测试样本。R 轮循环训练后, 使得 64 组数据均作为训练集和测试集, 以此来提升模型的准确率。通过 MATLAB 运行代码, 最终得到该 BP 神经网络模型的均方误差 MSE 为 0.038 13, 小于 0.1, 即认为该 BP 神经网络模型有效, 图 9 为膝关节支具 CMF 决策模型预测值和期望值的对比。

通过构建 BP 神经网络, 最终得到膝关节支具 CMF 方案及其基于“轻盈的-笨重的”这一感性词对的评价预测值之间的映射关系, 预测值最高的前 15 个 CMF 方案如表 8 所示。其中, 评价最高的方案所对应的 CMF 要素可结合其编码与图 3 进行逆推, 得到的最优方案对应的 CMF 要素如表 9 所示。

表6 “轻盈的-笨重的”对应64个膝关节支具的评价值
Tab.6 Evaluation values of 64 knee braces under the word of "light-heavy"

序号	评价值	序号	评价值	序号	评价值	序号	评价值
1	1.83	17	1.7	33	1.38	49	1.35
2	2.04	18	1.56	34	1.8	50	1.62
3	1.88	19	1.62	35	1.54	51	1.48
4	1.51	20	1.35	36	1.62	52	1.3
5	1.75	21	1.48	37	1.59	53	1.59
6	1.94	22	1.72	38	1.59	54	1.75
7	1.43	23	1.62	39	1.59	55	1.27
8	1.56	24	1.3	40	1.48	56	1.48
9	1.8	25	1.51	41	1.51	57	1.86
10	1.62	26	1.43	42	1.51	58	1.43
11	1.78	27	1.41	43	1.41	59	1.48
12	1.38	28	1.46	44	1.72	60	1.35
13	1.75	29	1.41	45	1.54	61	1.64
14	1.54	30	1.7	46	1.62	62	1.41
15	1.35	31	1.51	47	1.41	63	1.7
16	1.51	32	1.33	48	1.83	64	1.38

表7 64个膝关节支具方案编码
Tab.7 Codes of 64 knee brace solutions

序号	色彩 (Color)									材质 (Material)			工艺 (Finishing)		
	A 部分金属类			B 部分塑料类			C 部分布艺类			A	B	C	A	B	C
	H	S	V	H	S	V	H	S	V	部分金属类	部分塑料类	部分布艺类	部分金属类	部分塑料类	部分布艺类
	编码1	编码2	编码3	编码4	编码5	编码6	编码7	编码8	编码9	编码10	编码11	编码12	编码13	编码14	编码15
1	000010	00100	10000	001000	01000	10000	000100	01000	10000	100	100	100	100	100	100
2	000100	00100	01000	000010	00001	01000	100000	10000	10000	100	010	001	100	010	001
3	001000	00001	10000	001000	01000	00010	000001	01000	10000	100	001	010	100	001	010
4	100000	00100	10000	000001	00010	00001	100000	01000	01000	010	100	001	100	010	100
5	000010	10000	10000	000010	00010	10000	010000	00100	01000	010	010	010	100	001	001
6	100000	10000	01000	010000	00100	10000	000100	01000	00001	010	001	100	100	100	010
7	010000	10000	10000	010000	01000	00001	100000	00010	00100	001	100	010	100	001	100
8	000001	00001	01000	000010	00100	01000	100000	00010	10000	001	010	100	100	100	001
9	000010	10000	01000	000001	01000	10000	001000	10000	00010	001	001	001	100	010	010
10	010000	00100	10000	010000	10000	01000	000010	10000	00010	100	100	100	010	100	001
11	000001	00100	00010	100000	01000	10000	010000	10000	00001	100	010	001	010	010	010
12	010000	01000	10000	001000	00100	10000	100000	00001	00010	100	001	010	010	001	100
13	001000	10000	00001	100000	10000	01000	100000	01000	00010	010	100	001	010	010	001
...															
64	010000	00001	00100	000001	00001	00010	010000	10000	10000	100	100	100	001	001	100

表8为通过定量分析得到的感性词汇“轻盈的”对应的膝关节支具最佳方案的CMF设计要素，其中金属支架部分色彩接近深枪色，材质为铝合金，工艺为拉丝；塑料部分色彩同样接近深枪色，材质为ABS塑料，工艺为抛光；布艺部分色彩接近草绿色，材质

为皮革，工艺为编织。该结果与定性分析结果(表5)对比可知，基于“轻盈的”这一感性词汇，其在色彩、材质和工艺方面对应的设计要素大致相同，说明定性分析和定量分析的研究结果均具有一定参考性。差异主要体现在布艺的材质方面，通过定性分析发现，

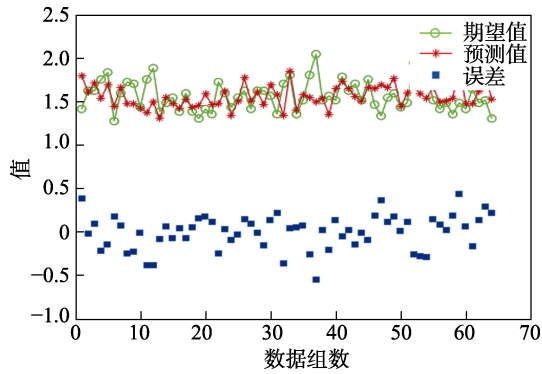


图 9 膝关节支具 CMF 决策模型预测值和期望值对比
Fig.9 Comparison of predicted value and expected value of CMF decision model for knee brace

用户更倾向于“透气棉”材质,而在定量分析阶段,预测的结果为“皮革”材质更优。存在差异性的原因主要包括两点:1)定性分析可提供大致方向的推断,而非绝对的必然性。同时,预测模型的准确率亦无法达到 100%,且主观的感性意象评价也无法保证 100%的准确率。2)单一 CMF 设计要素的分析和全设计要素组合后的评价也存在难以避免的误差性,各 CMF 设计要素之间的耦合性也是未来研究的要点。尽管定性分析和定量分析之间存在些许差异,但二者的吻合度较高,说明该 CMF 决策模型具有较大的现实意义,能够继续对 CMF 的设计要素进行深入挖掘。

表 8 膝关节支具较优方案编码及评价价值

Tab.8 Code and evaluation value of the optimal solution for knee brace

序号	编码	评价价值
1	1000001000010000100000100001000001000000100000010000100100100100100100001010	3.260 564 818
2	10000010000100001000001000010000100001000001000010000100100100100010100010	3.194 616 890
3	10000010000100001000001000010000100001000001000010000100100100100001100010	3.169 067 583
4	1000001000010000100000100001000010000100000100001000010010000100101010010	3.162 521 539
5	1000001000010000100000100001000010000100000100001000001010010001010100010	3.108 401 403
6	10000010000100001000001000010000100001000001000010000100100010010010010010	3.084 776 814
7	10000010000100001000001000010000100001000001000010000100100100100100100010	3.069 659 984
8	10000010000100001000001000010000100001000001000010000100001100010010010	3.049 474 103
9	10000010000100001000001000010000100001000001000010000100100100100100010010	3.043 719 920
10	10000010000100001000001000010000100001000001000010000100100100100001100001	3.042 196 204
11	10000010000100001000001000010000100001000001000010000100100100100010100001	3.013 781 066
12	10000010000100001000001000010000100001000001000010000100001100010100010	3.009 157 284
13	10000010000100001000001000010000100001000001000010000100100001001100001	3.002 880 675
14	10000010000100001000001000010000100001000001000010000100100001010100001	2.996 650 046
15	10000010000100001000001000010000100001000001000010000100100001010010001	2.996 480 161

表 9 BP 神经网络输出膝关节支具最优方案 CMF 要素
Tab.9 Elements of CMF in the optimal solution of knee brace output by BP neural network

部件	要素			材质	工艺
	H	S	V		
A 部分	30°	10%	10%	铝合金	拉丝
B 部分	30°	10%	10%	ABS	抛光
C 部分	90°	50%	50%	皮革	编织

为了使色彩数值更便于工程应用,将 HSV 数值转化为 RGB 数值。将各 HSV 数值根据式(1)~(5)转化为 RGB 后,得到膝关节支具 A、B、C 三个部分分别对应的 RGB 数值为: $R_A=25, G_A=24, B_A=22$; $R_B=25, G_B=24, B_B=22$; $R_C=95, G_C=127, B_C=63$ 。

由此可知,膝关节支具的塑料和金属支架部分采用深灰色系、布艺部分采用绿色系时,其在感性意象“轻盈的”词汇下表现最佳,但鉴于建立 BP 神经网络时采用色彩输入端的数据为区间代表性数值,故根据 BP 神经网络只能确定产品的具体材质和工艺,而色彩部分仅为区间代表性颜色,而非准确数值,故需对色彩部分进行再次筛选。

由于金属和塑料部分的色彩 HSV 所处色区间均为深灰色至近黑色,两端取极限值赋色时差异微弱,故色彩部分以绿色系的布艺部分研究为主。其色调为 90°,鉴于计算时取区间中间值,对照图 3,该区间应为 60°~120°之间的数值,经过调研可知,相差 10°时肉眼对色彩的分辨已较为微弱,故以 10°为间隔值,将 60°~120°等分为 6 个区间,每个区间取其中间值再次赋色,分别为 65°、75°、85°、95°、105°、115°。布艺部分的饱和度和明度数值均为 50%,对照图 7,则其对应的区间为 40%~60%,通过对比可知,相差

4%时肉眼对饱和度和明度的分辨较为微弱,故以4%为间隔值,将40%~60%分为5个区间,取各区间中间值,分别为42%、46%、50%、54%、58%。由此进行排列组合,产生150个方案,运用正交设计法筛选出36个代表性方案进行产品方案渲染,即在布

艺部分以绿色系为主色继续渲染细分方案36个,如图10所示。得到36个渲染方案后,继续请受邀用户对细分方案以感性意象词“轻盈的-笨重的”进行评分,评价指标仍为1~5分,36个方案的评分如表10所示。

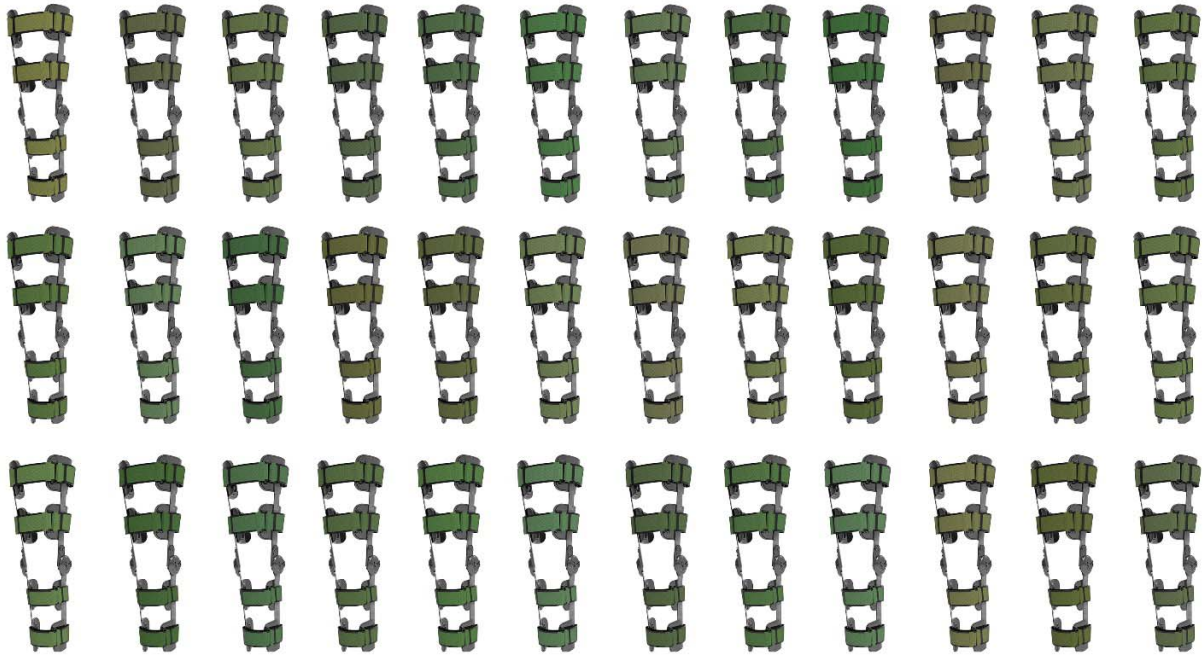


图10 膝关节支具最优色彩区间细分方案效果图

Fig.10 Renderings of the subdivision solution of the optimal color range of the knee brace

表10 “轻盈的”对应最优色彩区间细分方案评价价值

Tab.10 Evaluation value of optimal color interval subdivision solution under the word of "light"

序号	评价价值	序号	评价价值	序号	评价价值
1	2.85	13	3.36	25	3.26
2	2.45	14	3.53	26	3.65
3	3.18	15	3.79	27	3.79
4	2.51	16	2.78	28	3.24
5	3.33	17	2.81	29	3.69
6	3.78	18	3.09	30	3.43
7	3.25	19	2.79	31	2.71
8	3.63	20	2.95	32	3.49
9	3.83	21	3.24	33	3.80
10	2.78	22	2.81	34	2.83
11	2.98	23	2.92	35	2.90
12	3.13	24	3.29	36	2.49

通过数据分析发现,方案的HSV数值与用户感性意象评价价值存在线性相关关系,故将方案HSV数值和评价价值进行线性回归分析,回归结果如表11所示。

根据线性回归分析结果F值,分析其是否可以显著地拒绝总体回归系数为0的原假设($p < 0.01$),从F检验的结果可知,显著性P值为0.000,拒绝回归系

数为0的原假设,因此模型基本满足要求。VIF作为检验模型共线性的要素,当VIF值小于10时,即可认为解释变量间存在高度相关关系,据表11可知,VIF数值均远小于10,无多重共线性问题,故该模型构建良好。 R^2 为曲线回归的拟合程度,越趋近1时拟合越好,表中 R^2 数值为0.825,即曲线回归拟合良好。综上并结合非标准化系数,该线性回归模型的公式为 $y = -0.612 + 0.019H + 2.43S + 1.771V$,由得到的回归方程可知,色调(H)、饱和度(S)、明度(V)的系数均为正数,故其数值越高,所对应的感性评价价值也越高。因此,分别取三者区间的最高值 120° 、60%、60%,通过公式将其转化为RGB数值,对应值分别为 $R=61$ 、 $G=153$ 、 $B=61$;将此RGB数值带入原方案中替换布艺部分的色彩并进行效果图绘制,对应的方案如图11所示。

通过运用BP神经网络对产品色彩区间和感性意象评价价值进行模型构建,得到基于“轻盈的-笨重的”这一感性意象词对应的最佳方案,该方案确定了材料和工艺的唯一解以及色彩的区间解。由于金属和塑料部分的色彩近乎黑色,在该区间内色彩变化对方案的影响十分微弱,而布艺部分的色彩区间为绿色,故以布艺部分的色彩为研究主体再次构建数学模型,以便

表 11 最优色彩区间细分方案线性回归分析 ($n=36$)
 Tab.11 Linear regression analysis of optimal color interval subdivision solution ($n=36$)

变量	非标准化系数		标准化系数	t	p	VIF	R^2	调整 R^2	F
	B	标准误差	Beta						
H	0.019	0.002	0.8	10.761	0.000	1.009	0.825	0.808	50.15
S	2.43	0.53	0.345	4.584	0.000	1.033			
V	1.771	0.531	0.252	3.334	0.002	1.043			
常数项	-0.612	0.425		-1.439	0.160				



图 11 膝关节支具最优色彩区间细分方案效果图
 Fig.11 Renderings of the subdivision solution of the optimal color range of the knee brace

求取色彩具体数值。通过对布艺部分的色彩进行区间细分, 同时将渲染的 CMF 方案进行用户感性意象评价, 最终得到 36 个方案及其用户感性意象评价价值。通过数据分析, 其 H 、 S 、 V 数值与用户感性意象评价价值存在线性回归关系, 并以此求得线性回归方程, 最终确定了该色彩方案的具体 RGB 数值。

5 结语

本研究以膝关节支具为例, 运用文本挖掘方式构建了产品感性意象集合, 并以此为基础建立了感性词汇和膝关节支具 CMF 单一设计要素的关系矩阵, 为后续 CMF 设计要素的选择提供了支撑。随后运用 BP 神经网络和线性回归等方法构建了产品 CMF 决策模型, 实现膝关节支具产品特定感性词汇对应的 CMF 设计要素即色彩、材质和工艺的精准量化, 最后通过对构建的 CMF 决策模型的 MSE 均方差值与 F 检验的分析, 验证了该方法的可行性。主要结论如下:

1) 通过 BP 神经网络和线性回归方法的结合, 能够有效分析 CMF 各设计要素与感性意象之间的映射关系, 并精准预测最佳方案的色彩取值以及材料、工艺类别的选择。

2) 通过文本挖掘方式获取用户对产品的感性意象, 相较于以往主观问卷的形式, 能够保证感性意象的真实性、精准性, 将其应用到 CMF 决策模型中, 能够提升研究结果的信度与效度。

3) 构建的康复产品 CMF 决策模型能够有效预测特定感性意象对应的用户偏好 CMF 方案, 为企业和设计人员定量筛选产品最佳 CMF 方案提供切实可行的方法。

参考文献:

- [1] 史珈铭, 刘晓婷. 老年人社区康复服务需求及其影响因素[J]. 中国康复理论与实践, 2021, 27(3): 334-340.
SHI Jia-ming, LIU Xiao-ting. Rehabilitation Service Demand in Elderly Community and Its Influence Factors[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2021, 27(3): 334-340.
- [2] 冯毅雄, 娄山河, 王绪鹏, 等. 面向性能的定制产品感性意象评价方法研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(9): 181-190.
FENG Yi-xiong, LOU Shan-he, WANG Xu-peng, et al. Research on Performance-Oriented Perceptual Image Evaluation Method of Customized Products[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(9): 181-190.
- [3] 汪颖, 张三元, 张克俊, 等. 产品材料质感偏好意象进化认知算法与系统[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(4): 762-770.
WANG Ying, ZHANG San-yuan, ZHANG Ke-jun, et al. Preference Learning for Evolutionary Cognition Algorithm and System of Product Material Texture[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(4): 762-770.
- [4] 王园园, 蒋超, 俞琳, 等. 基于感性工学和视觉意象的机械产品表面涂装质感设计方法[J]. 包装工程, 2022, 43(6): 56-61.
WANG Yuan-yuan, JIANG Chao, YU Lin, et al. Method of Mechanical Products Surface Coating Texture Design Based on Kansei Engineering and Visual Imagery[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(6): 56-61.
- [5] 苏建宁, 胡晴, 张书涛, 等. 面向汽车车身色彩-材料-表面处理工艺的耦合设计特性研究[J]. 机械设计, 2020, 37(4): 119-125.
SU Jian-ning, HU Qing, ZHANG Shu-tao, et al. Study on Coupling Design Characteristics of Color-Material-Surface Treatment Technology for Automobile Body[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(4): 119-125.
- [6] 杨冬梅, 刘佳鑫, 张健楠, 等. 面向居家辅助康复产品的设计评价方法[J]. 机械设计, 2022, 39(1): 154-160.
YANG Dong-mei, LIU Jia-xin, ZHANG Jian-nan, et al. Design Evaluation Method for Home-Based Rehabilitation Products[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(1): 154-160.
- [7] 孙新竹. 基于感性工学的消费电子产品 CMF 设计研究——以电视机为例[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
SUN Xin-zhu. Research on CMF Design of Consumer Electronics Based on Kansei Engineering: Taking TV as

- an Example[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [8] RAVI K, RAVI V. A Survey on Opinion Mining and Sentiment Analysis: Tasks, Approaches and Applications[J]. Knowledge-Based Systems, 2015, 89: 14-46.
- [9] 张洁, 汪俊亮, 吕佑龙, 等. 大数据驱动的智能制造[J]. 中国机械工程, 2019, 30(2): 127-133.
ZHANG Jie, WANG Jun-liang, LYU You-long, et al. Big Data Driven Intelligent Manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(2): 127-133.
- [10] HAYKIN S. 神经网络原理[M]. 叶世伟, 史忠植, 译. 北京: 机械工业出版社, 2004.
HAYKIN S. Neural Network Principle[M]. YE Shi-wei, SHI Zhong-zhi, Translate. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [11] 刘月林, 王习羽, 王剑. 基于三角模糊和BP神经网络的产品意象造型设计[J]. 包装工程, 2021, 42(14): 185-193.
LIU Yue-lin, WANG Xi-yu, WANG Jian. Product Image Modeling Design Based on Triangular Fuzzy and BP Neural Network[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(14): 185-193.
- [12] 朱彦, 陈刚. 基于感性工学和BP神经网络的服务机器人头部形态设计研究[J]. 包装工程, 2016, 37(14): 63-67.
ZHU Yan, CHEN Gang. Research on Head Shape Design of Service Robot Based on Kansei Engineering and BP Neural Network[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(14): 63-67.
- [13] 常巧红, 高满屯. 基于HSV色彩空间与数学形态学的车牌定位研究[J]. 图学学报, 2013, 34(4): 159-162.
CHANG Qiao-hong, GAO Man-tun. Research on License Plate Location Based on HSV Color Space and Mathematical Morphology[J]. Journal of Graphics, 2013, 34(4): 159-162.
- [14] 秦绪佳, 程燕飞, 范颖琳, 等. 基于三边滤波的HSV色彩空间Retinex图像增强算法[J]. 小型微型计算机系统, 2016, 37(1): 168-172.
QIN Xu-jia, CHENG Yan-fei, FAN Ying-lin, et al. Image Enhancement Algorithm Based on Retinex of Tri-lateral Filter in HSV Color Space[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2016, 37(1): 168-172.
- [15] 王煜, 邓晖, 李晓瑶, 等. 自然语言处理技术在建筑工程中的应用研究综述[J]. 图学学报, 2020, 41(4): 501-511.
WANG Yu, DENG Hui, LI Xiao-yao, et al. A Review of Natural Language Processing Application in Construction Engineering[J]. Journal of Graphics, 2020, 41(4): 501-511.

(上接第143页)

- [9] 赵秦琨, 许永生. 地域文化元素在现代有轨电车造型设计中的应用研究[J]. 工业设计, 2019(10): 36-38.
ZHAO Qin-kun, XU Yong-sheng. Research on the Applications of Regional Cultural Elements in Modelling Design of Modern Tram[J]. Industrial Design, 2019(10): 36-38.
- [10] 王玮, 王喆. 国外现代有轨电车外观设计分析[J]. 都市轨道交通, 2013, 26(6): 140-142.
WANG Wei, WANG Zhe. Analysis on Foreign Modern Tram Appearance Design[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2013, 26(6): 140-142.
- [11] 王玮, 王喆. 基于审美范畴论的法国现代有轨电车设计之美[J]. 创意与设计, 2015(1): 87-96.
WANG Wei, WANG Zhe. France Modern Tramway Design Aesthetics Based on Aesthetic Category Theory[J]. Creation and Design, 2015(1): 87-96.
- [12] 向泽锐. 现代有轨电车车身造型设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
XIANG Ze-rui. Research on Body Modeling Design of Modern Trams[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [13] 陈威, 董石羽, 向泽锐. 基于形状文法的现代有轨电车造型谱系化设计研究[J]. 包装工程, 2018, 39(22): 157-163.
CHEN Wei, DONG Shi-yu, XIANG Ze-rui. Research on the Design of Modern Tram Modeling Pedigree Based on Shape Grammar[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(22): 157-163.
- [14] 王海霞, 董宁, 徐伯初. 高速列车涂装设计的感性转向——车体涂装设计的文化与心理学视角[J]. 西南交通大学学报(社会科学版), 2012, 13(4): 61-64.
WANG Hai-xia, DONG Ning, XU Bo-chu. Sensibility in the Change of Direction in the Coating Design for High-Speed Trains—Analysis from the Cultural and Psychological Perspectives[J]. Journal of Southwest Jiaotong University (Social Sciences), 2012, 13(4): 61-64.
- [15] 支锦亦. 铁路客车外观色彩设计探讨[J]. 中国铁路, 2007(3): 66-69.
Zhi Jin-yi. Discussion on Appearance Color Design of Passenger Train[J]. Chinese Railways, 2007(3): 66-69.
- [16] 苏建宁, 李鹤歧, 李奋强. 面向用户的产品造型设计要素分析研究[C]// 2004年工业设计国际会议论文集. 北京: 机械工业出版社, 2004.
SU Jian-ning, LI He-qi, LI Feng-qiang. Ministry of Appearance Design Examination of the State Intellectual Property Office of P.R.[C]// Proceedings of the 2004 International Conference on Industrial Design. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [17] 武玉娇, 郑枫, 葛玉鹏. 基于感性意象的白酒酒瓶造型多维度特征分析[J]. 包装工程, 2021, 42(18): 253-261.
WU Yu-jiao, ZHENG Feng, GE Yu-peng. Multidimensional Feature Analysis of Liquor Bottle Shape Based on Consumer Demand[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(18): 253-261.
- [18] MONDRAGÓN S, COMPANY P, VERGARA M. Semantic Differential Applied to the Evaluation of Machine Tool Design[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2005, 35(11): 1021-1029.