

DOI: 10.3901/JME.2023.03.218

考虑用户权重不一致性和复杂交互影响的产品 可持续设计需求评估研究*

景立挺¹ 陈盈臣¹ 谢 静² 谭博文¹ 姜少飞¹

(1. 浙江工业大学机械工程学院 杭州 310023;

2. 杭州杭氧透平机械有限公司 杭州 311300)

摘要: 针对产品概念设计阶段中可持续设计需求重要性难以准确评估的问题, 提出一种考虑用户权重不一致性和需求交互影响的可持续设计需求评估模型, 以支持产品开发在下游过程中的环境影响评估。提出基于可信度函数的改进 Kano 模型获取用户可信度实现可持续设计需求的评价数据集成, 并利用信息熵得到可持续设计需求的初始权重。在此基础上, 借助模糊决策和试验评估实验室法(Decision-making and trial evaluation laboratory, DEMATEL)获取各个需求的影响关系有向图, 构建考虑需求交互影响的综合权重函数, 实现可持续设计需求的排序和重要性分析。以电冰箱产品开发为例实现了 13 个可持续设计需求重要性的评估和分析, 同时进行方法对比和敏感性分析, 验证所提方法的可靠性和可行性。

关键词: 改进 Kano 模型; 模糊 DEMATEL 模型; 可持续设计; 可信度模型; 概念设计

中图分类号: TH166

Research on the Evaluation of Product Sustainable Design Demands Considering the Inconsistency of Users' Weights and Complex Interaction

JING Liting¹ CHEN Yingchen¹ XIE Jing² TAN Bowen¹ JIANG Shaofei¹

(1. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023;

2. Hangzhou Hangyang Turbomachinery Co., Ltd., Hangzhou 311300)

Abstract: To address the problem that the importance of sustainable design requirements in the product conceptual design phase is difficult to assess accurately, a sustainable design demands evaluation model considering the inconsistency of user weight and demand interactive is proposed to support the environmental impact assessment of product development in the downstream process. An improved Kano model based on the trust function is proposed to obtain the users' trust to integrate the evaluation data of sustainable design demand, and the initial weight of each sustainable design demand is obtained by using information entropy. On this basis, the fuzzy Decision-making and trial evaluation laboratory (DEMATEL) is used to construct a directed graph of the impact relationship of demands, a comprehensive weight function considering the demands interactive impact is formed to realize the ranking and importance analysis of sustainable design demands. Finally, a refrigerator is used as a case study to realize the evaluation and analysis of 13 sustainable design demands' importance, and the results comparison and sensitivity analysis are carried out to verify the reliability of the proposed approach.

Key words: improved Kano model; fuzzy DEMATEL model; sustainability; trust model; conceptual design

0 前言

不断增加的环境问题导致各国对生成可持续产

品的行业实行了严格的政策和法规^[1]。在我国, 部分家电产品(如冰箱, 计算机, 手机)在全生命周期设计过程中呈现能源浪费、利用率不高、环境负面影响等可持续发展现象^[2], 因而产品可持续设计一直是被广泛关注的热点领域。概念设计作为工程系统设计的起点, 其输出的优质原理方案会影响后续详细方案的环境、社会、经济性等设计价值^[3], 并

* 国家自然科学基金(52105282)、浙江省自然科学基金(LQ22E050011)和中国博士后科学基金(2021M702893)资助项目。20220326 收到初稿, 20220824 收到修改稿

且会引起后续可持续设计迭代等问题, 从而影响产品的可持续发展^[4]。需求分析作为产品开发的早期设计阶段, 决定了后续产品技术准则制定的有效性以及可持续设计方案的决策质量^[5-6]。如何在产品概念设计阶段中聚焦于用户满意度较高的可持续设计需求, 挖掘对产品可持续性价值最为敏感的核心需求, 是提高产品早期设计方案经济性和降低产品对环境的影响的关键环节。

近年来, 概念设计阶段中关于产品可持续设计需求重要性分析问题, 主要围绕可持续设计需求的分析和转换求解两个方面展开研究。

在需求分析中, 相关研究主要分为两个方面, 一是需求获取, 二是需求重要性评估。在需求获取中, 主要将用户对产品的设计期望转化为具体需求的规范表达, 如张凤伟等^[7]提出利用 SAS 软件从 Web 和专利知识两方面获取用户需求; 曹国忠等^[8]基于产品、用户、预测三个维度对用户的感性需求进行获取, 为设计师指出明确的方案设计路径。在需求重要性评估中, 采用评估方法对需求满意度进行判断, 继而形成需求的排序结果。例如, 张付英等^[9]利用 Kano 模型获取用户对可持续产品的经济和社会需求, 并求解相应权重。针对可持续产品开发中可能会降低客户可持续要求的若干因素, BIJU 等^[10]提出通过 CSRE 矩阵来评估需求的重要性。MA 等^[11]提出一种产品设计组件寿命终止策略的模糊评估模型, 用于在不确定设计环境中预测各个策略下的可持续性价值。前述工作可以有效评估出核心设计需求来确保产品的可持续性价值, 但涉及多个用户或专家的评估, 易形成不一致评价结果问题。

在需求转换求解中, SOHANI 等^[12]在敏感性分析中研究了需求的变化对两种电力需求设计的优化结果的影响, 并计算其重要程度。CHAUDHA 等^[13]集成质量功能展开(Quality function deployment, QFD)和 Kano 模型, 通过识别顾客的潜在需求来实现顾客对产品的总体满意度。针对需求评价环境的不确定性, 张妮等^[14]利用模糊 QFD 分析需求和组件模块的关联关系, 以此确定需求重要度。上述模型虽能有效考虑需求提取的主观性和评价的模糊性, 但却忽略了需求之间的相互影响关系。为此, 伍晓榕等^[15]通过 DEMATEL 建立绿色工艺评估指标之间的影响关联矩阵, 并利用 VIKOR 对绿色工艺参数进行决策。LIN 等^[16]运用 DEMATEL 对评价指标进行量化分析, 并构建需求影响关联图来表达各指标的影响关系。此外, DEMATEL 在智能产品

服务系统^[17], 需求风险因素评估^[18], 企业竞争力^[19]得到了有效应用。相较于以往借助传统 Kano 模型进行需求分类, 或基于 QFD 模型进行顾客需求到技术特征的转化, 均忽略了信息收集时用户权重的一致性和需求间的内在影响关系, 导致评估结果不可靠。此外, 与一般设计需求不同的是, 可持续设计需求源自产品设计过程中的各个阶段, 其在生命周期中呈现出更为复杂的多重交互关系, 故在可持续设计需求评价过程中考虑其对需求排序结果的影响。

因此, 如何在概念设计阶段中客观获取用户关于产品可持续设计需求的满意度, 求解可靠的需求权重, 进而在提升产品功能和经济性的同时减少对环境的负影响, 是产品可持续设计的核心内容之一。根据前述文献关于可持续设计需求评估的问题, 致使现有评估过程仍存在以下限制。

(1) 传统 Kano 实现可持续设计需求权重的直接获取^[20], 却忽略用户学科背景的差异性导致各个用户评价数据客观存在着不同的可信度, 影响可持续设计需求排序的评估结果的客观性和有效性, 因而需要建立面向用户权重不一致的需求评价数据集模型, 消除群体不一致评估数据对需求排序结果的影响。

(2) 概念设计知识具有模糊性, 源自多个阶段的可持续设计需求相互依赖或冲突, 导致可持续设计需求之间客观存在交互关系^[21]。模糊 DEMATEL 虽能获取影响关系程度, 却没有充分考虑多个需求内在影响形成的传递效用对其他需求的相关影响, 因而需要将其考虑到需求权重求解过程中。

(3) 以往研究引入协调系数对 Kano 和 DEMATEL 的权重值进行直接分配, 但该系数依赖于专家的主观偏好, 造成需求权重排序结果的波动性。因此, 需要建立一个可靠的综合权重函数, 即考虑符合群体一致性的改进 Kano 模型中得到的可持续设计需求的满意度, 也考虑需求内在影响形成的传递效用对综合权重的影响程度, 减少方案求解中对环境有害的设计需求的关注度。

1 基于模糊 Kano 模型的需求评估

在本研究中, 通过调查问卷获取可持续设计需求之后, 将利用 Kano 模型对可持续设计需求进行初始权重求解。Kano 模型是一种贴近用户真实想法的定性分类方法, 并广泛应用于产品需求、功能等分类过程中^[22]。其将设计需求分为五个类

别：基本型需求(M)、期望型需求(O)、兴奋性需求(A)、无差异需求(I)和反向需求(R)，具体描述如表 1 所示。其中，5 种需求类型的用户满意度会随需求的实现率升高而产生不同的曲率表现，如图 1 所示。

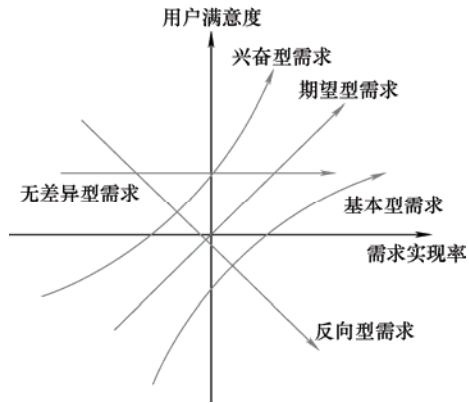


图 1 Kano 类型图

表 1 需求类型及描述

Kano 类别	需求类型	描述
M	基本型需求	当提供此需求，用户满意度不会提升，当不提供此需求，用户满意度会大幅降低
O	期望型需求	当提供此需求，用户满意度会提升，当不提供此需求，用户满意度会降低
A	兴奋性需求	用户意想不到的，如果不提供此需求，用户满意度不会降低，但当提供此需求，用户满意度会有很大提升
I	无差异需求	无论提供或不提供此需求，用户满意度都不会有改变，用户根本不在意
R	反向需求	用户根本都没有此需求，提供后用户满意度反而会下降

然而，传统 Kano 模型问卷中，用户只能对需求进行单一类别评估，忽略了设计师背景知识差异、使用条件受限等客观限制因素，导致用户对于产品可持续设计需求评估容易呈现片面性和模糊性^[23]，导致最终调查结果的不可靠。为此，提出通过模糊 Kano 模型对需求整理分类，模糊 Kano 模型能够允许被调查者运用位于[0,1]之间的数对多个类别选项进行可能度评价，其中可能度(即可能性程度)^[24]表示一个衡量用户评价在五类 Kano 类别中的隶属程度。图 2 通过比较模糊问卷与传统问卷以说明前者更能够适应用户评价心理，符合评价时人类的犹豫性，给设计者最真实地反馈数据。

通过关注兴奋型、期望型、基本型三类需求，借助需求分类对照表(见第 2 节)构建各个需求的属性类别可能度向量，用于客观表达用户对可持续设计需求的模糊偏好。

产品...需求		感到兴奋	理应如此	无所谓	勉强接受	讨厌
传统 Kano 问卷	具备	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	不具备	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
产品...需求		感到兴奋	理应如此	无所谓	勉强接受	讨厌
模糊 Kano 问卷	具备	0.5	0.3	0.2	0	0
	不具备	0	0	0.2	0.6	0.2

图 2 两种 Kano 问卷的对比

2 模型构建

2.1 模型求解分析框架

评估模型主要分为三部分，首先通过模糊 Kano 模型获取用户对不同需求的可能度向量，并构建可信度函数计算用户的可信度并实现群体一致性数据的集成，随后基于信息熵计算需求的初始权重；在此基础上，通过模糊 DEMATEL 求解需求间的影响重要度和因果关系；最后构造需求复杂影响关系的综合权重函数，从而对初始权重进行修正，以此获取影响产品可持续性开发的核心设计需求，所提评估方法与分析框架如图 3 所示。

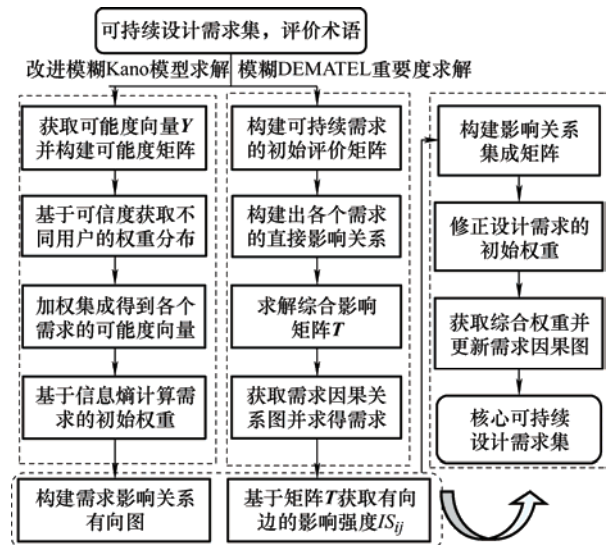


图 3 可持续设计需求评估与分析框架

2.2 改进模糊 Kano 模型求解

(1) 基于模糊 Kano 模型的可持续设计需求分类步骤如下所述。

步骤 A1：限于文章长度，仅以某一用户的调查表为例，对某个需求的模糊评价按照提供与否来获取两个调查矩阵，其中，提供需求的调查矩阵 $P=[p_1, p_2, p_3, p_4, p_5]$ ，不提供需求的调查矩阵 $N=[n_1, n_2, n_3, n_4, n_5]$ ，得到如式(1)所示的交互矩阵 S ，评价

值表示各个类别的可能度。

$$S = P^T N = \begin{bmatrix} p_1 n_1 & p_1 n_2 & p_1 n_3 & p_1 n_4 & p_1 n_5 \\ p_2 n_1 & p_2 n_2 & p_2 n_3 & p_2 n_4 & p_2 n_5 \\ p_3 n_1 & p_3 n_2 & p_3 n_3 & p_3 n_4 & p_3 n_5 \\ p_4 n_1 & p_4 n_2 & p_4 n_3 & p_4 n_4 & p_4 n_5 \\ p_5 n_1 & p_5 n_2 & p_5 n_3 & p_5 n_4 & p_5 n_5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

步骤 A2：依据表 2 所示的 Kano 评价表对矩阵 S 中的各项需求进行分类。

表 2 Kano 评价表

正向问题	反向问题				
	感到兴奋 Q1	理应如此 Q2	无所谓 Q3	勉强接受 Q4	讨厌 Q5
Q1	Q	A	A	A	O
Q2	R	I	I	I	M
Q3	R	I	I	I	M
Q4	R	I	I	I	M
Q5	R	R	R	R	Q

于是,基本型需求(M)所对应交互矩阵中的三个值 $p_2 n_5$ 、 $p_3 n_5$ 、 $p_4 n_5$ 相加所得为 m_m , 其他类别的可能度计算过程相似。可能度向量表示对某个需求关于 5 个 Kano 类别的隶属度集成向量, 去除疑问结果(Q), 得到需求的可能度向量 Y 如下

$$Y = \left(\frac{m_m}{M}, \frac{m_o}{O}, \frac{m_a}{A}, \frac{m_i}{I}, \frac{m_r}{R} \right) \quad (2)$$

步骤 A3：通过上述步骤, 可以得到多个用户关于可持续设计需求的可能度矩阵 T_{SR} , 以可持续设计需求 SR_1 为例, 其可能度矩阵如式(3)所示。

$$T_{SR_1} = \begin{matrix} & \begin{matrix} M & O & A & I & R \end{matrix} \\ \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \vdots \\ R_e \end{matrix} & \begin{bmatrix} m_{m1} & m_{o1} & m_{a1} & m_{i1} & m_{r1} \\ m_{m2} & m_{o2} & m_{a2} & m_{i2} & m_{r2} \\ m_{m3} & m_{o3} & m_{a3} & m_{i3} & m_{r3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{me} & m_{oe} & m_{ae} & m_{ie} & m_{re} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

式中, R_e 表示访谈用户 e , 其对应的行表示为该用户评估 SR_1 关于 5 个 Kano 类别的可能度向量。

以往 Kano 模型中多个用户的可能度向量通过平均操作^[24]或向量求和^[25]进行集成, 却忽略不同用户权重的差异性, 导致冲突评价信息无法真实反映出用户的满意度。

(2) 基于可信度模型的可持续设计需求评价数据集成。

文中可信度概念来源于 DS 证据理论中对冲突

证据可信度的定义^[26-27]。在可信度模型中, 主要分为两个部分, 一是先计算各个用户评价数据之间的相似度来获取该用户关于其他用户的支持度, 相似度越大表示该用户的支持度也越大; 二是通过对各个用户的支持度进行归一化来得到各个用户的可信度, 即用户权重, 可信度越大表示对应用户赋予的评价数据具有更强的说服力。接着, 以可持续设计需求 SR_1 为例, 获取需求的调查矩阵 P 和 N , 并以 5 个用户问卷内容来举例说明, 评价矩阵如下所示

$$P_{SR_1} = \begin{matrix} \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (4)$$

$$N_{SR_1} = \begin{matrix} \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} & n_{15} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & n_{24} & n_{25} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} & n_{34} & n_{35} \\ n_{41} & n_{42} & n_{43} & n_{44} & n_{45} \\ n_{51} & n_{52} & n_{53} & n_{54} & n_{55} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (5)$$

通过步骤 A1-A2 对 5 个用户的评价数据进行处理, 得到需求 SR_1 下各个用户关于五个类别的可能度向量, 以此构建需求 SR_1 的可能度矩阵, 如式(6)所示。

$$T_{SR_1} = \begin{matrix} & \begin{matrix} M & O & A & I & R \end{matrix} \\ \begin{matrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} m_{m1} & m_{o1} & m_{a1} & m_{i1} & m_{r1} \\ m_{m2} & m_{o2} & m_{a2} & m_{i2} & m_{r2} \\ m_{m3} & m_{o3} & m_{a3} & m_{i3} & m_{r3} \\ m_{m4} & m_{o4} & m_{a4} & m_{i4} & m_{r4} \\ m_{m5} & m_{o5} & m_{a5} & m_{i5} & m_{r5} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

其次, 利用余弦相似度函数计算不同用户之间可能度向量的相似度(S), 相似度越大表示两个用户之间的评价数据差异性越小, 计算过程如式(7)所示。其中, R_j 和 R_s 分别表示为用户 j 和用户 $s(1 \leq j, s \leq e \text{ 且 } j \neq s)$ 。

$$S_{R_j, R_s}^{SR_1} = \frac{\sum_{k=1}^5 (m_k^{R_j} \times m_k^{R_s})}{\sqrt{\sum_{k=1}^5 (m_k^{R_j})^2} \times \sqrt{\sum_{k=1}^5 (m_k^{R_s})^2}}, \quad k \in \{M, O, A, I, R\} \quad (7)$$

式中, $S_{R_j, R_s}^{SR_1}$ 表示在需求 SR_1 中用户 R_j 和 R_s 之间可能度向量的相似度。

随后, 计算得到用户 R_j 与其他用户的相似度, 可以构建需求 SR_1 中不同用户之间的相似度矩阵, 具体定义如式(8)所示。

$$\mathbf{Sim}_{\mathbf{SR}_1} = \begin{matrix} & \mathbf{R}_1 & \mathbf{R}_2 & \mathbf{R}_3 & \mathbf{R}_4 & \mathbf{R}_5 \\ \begin{matrix} \mathbf{R}_1 \\ \mathbf{R}_2 \\ \mathbf{R}_3 \\ \mathbf{R}_4 \\ \mathbf{R}_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & S_{R_1 R_2}^{SR_1} & S_{R_1 R_3}^{SR_1} & S_{R_1 R_4}^{SR_1} & S_{R_1 R_5}^{SR_1} \\ S_{R_2 R_1}^{SR_1} & 1 & S_{R_2 R_3}^{SR_1} & S_{R_2 R_4}^{SR_1} & S_{R_2 R_5}^{SR_1} \\ S_{R_3 R_1}^{SR_1} & S_{R_3 R_2}^{SR_1} & 1 & S_{R_3 R_4}^{SR_1} & S_{R_3 R_5}^{SR_1} \\ S_{R_4 R_1}^{SR_1} & S_{R_4 R_2}^{SR_1} & S_{R_4 R_3}^{SR_1} & 1 & S_{R_4 R_5}^{SR_1} \\ S_{R_5 R_1}^{SR_1} & S_{R_5 R_2}^{SR_1} & S_{R_5 R_3}^{SR_1} & S_{R_5 R_4}^{SR_1} & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (8)$$

基于相似度矩阵, 将其他用户关于用户 \mathbf{R}_j 的相似度进行求和, 以此计算其他用户对用户 \mathbf{R}_j 的支持度, 如式(9)所示。

$$Sup_{\mathbf{SR}_1}^{R_j} = \sum_{s=1, j \neq s}^5 S_{R_j R_s}^{SR_1} \quad (9)$$

随后, 获取各个用户的可信度 γ (式(10)), 可信度越大说明该用户的可能度向量具有越强的说服力, 需要赋予更大的用户权重。基于前述用户权重分布, 对需求 \mathbf{SR}_1 中用户可能度矩阵进行加权集成 (式(11)), 从而获取集成后的可能度向量。

$$\gamma_j = \frac{Sup_{\mathbf{SR}_1}^{R_j}}{\sum_{j=1}^5 Sup_{\mathbf{SR}_1}^{R_j}} \quad (10)$$

$$m_k^{SR_1} = \sum_{j=1}^5 m_{kj}^{SR_1} \gamma_j \quad (11)$$

(3) 基于信息熵的可持续设计需求初始权重求解。

熵源自信息理论, 是一个用于描述信息内容不确定程度的重要指标, 由 SHANNON^[28]引入并定义为信息熵。假设需求 \mathbf{SR}_v 中五个 Kano 类别的可能度向量为 $(\mathbf{Y}_M, \mathbf{Y}_O, \mathbf{Y}_A, \mathbf{Y}_L, \mathbf{Y}_R)$, 分别表示为五个 Kano 类别的离散概率分布, 其熵值如式(12)所示。其中, 熵值越大说明其各个类别的可能度差异越小, 从而提供的信息越少, 说明该需求的初始权重越小。

$$E(\mathbf{SR}_v) = -\frac{1}{\ln(5)} \sum_{k=1}^5 Y_k \ln(Y_k) \quad (12)$$

式中, Y_k 表示可能度向量的属性类别 k 对应的离散概率分布。

基于第(2)部分获取的所有可持续设计需求关于 Kano 类别的离散概率分布, 继而实现需求初始权重的计算, 如式(13)所示。

$$\omega_v = \frac{1 - E(\mathbf{SR}_v)}{\sum_{v=1}^m 1 - E(\mathbf{SR}_v)} \quad (13)$$

式中, $E(\mathbf{SR}_v)$ 表示该需求的信息熵; ω_v 表示可持续设计需求 \mathbf{SR}_v 的初始权重。

然而, 仅依靠改进模糊 Kano 模型来计算各个

可持续设计需求的权重, 往往会忽略其需求之间的内在影响关系, 导致排序结果不可靠。为此, 本研究将结合因果分析工具 DEMATEL^[29] 衡量设计需求间的影响关系, 保证最终需求排序结果的可靠性。

2.3 基于模糊 DEMATEL 的需求影响关系分析

通过模糊 DEMATEL 分析多个需求之间的相互影响关系, 并确定各个需求的影响重要度。同时, 三角模糊数被用来量化专家的主观评价结果^[30], 以此减少评价结果的不确定性。文中采用 5 级标度的语言术语分别为: 没有影响{N: (0.0, 0.1, 0.3)}、低影响{L: (0.1, 0.3, 0.5)}、中等影响{M: (0.3, 0.5, 0.7)}、高影响{H: (0.5, 0.7, 0.9)}和巨大影响{E: (0.7, 0.9, 1.0)}。其中, 模糊 DEMATEL 的求解步骤如下。

步骤 B1: 根据前述 Kano 分析的可持续设计需求, 确定 DEMATEL 分析对象。

步骤 B2: 专家 $h(1 \leq h \leq H)$ 通过判断需求之间的内在影响关系, 给出需求 \mathbf{SR}_v 对需求 \mathbf{SR}_q 的直接影响评价术语 $ID_{vq}^h(1 \leq v, q \leq f \text{ 且 } v \neq q)$ 。其中, 若 $v=q$ 则直接影响值为 0, 进而构建专家 h 的初始评价矩阵 \mathbf{IM}_h , 如式(14)所示。

$$\mathbf{IM}_h = \begin{matrix} & \mathbf{SR}_1 & \cdots & \mathbf{SR}_v & \cdots & \mathbf{SR}_f \\ \begin{matrix} \mathbf{SR}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{SR}_v \\ \vdots \\ \mathbf{SR}_f \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & \cdots & ID_{1v}^h & \cdots & ID_{1f}^h \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ ID_{v1}^h & \cdots & 0 & \cdots & ID_{vf}^h \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ID_{f1}^h & \cdots & ID_{fv}^h & \cdots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (14)$$

将初始评价矩阵中的语言术语表示为三角模糊数, 构建得到专家 h 的模糊直接影响关系矩阵。接着, 利用式(15)对多个专家的直接影响关系矩阵求均值, 进而整合成一个直接影响关系矩阵。矩阵 $\tilde{\mathbf{M}}$ 中 $\tilde{x}_{vf} = [x_{vf}^a, x_{vf}^b, x_{vf}^c]$ 为三角模糊数, 可以定义得到式(16)所示的三个清晰矩阵 $\mathbf{M}_p(p \in a, b, c)$ 。

$$\tilde{\mathbf{M}} = \frac{1}{H} \sum_{h=1}^H \tilde{\mathbf{x}}^h = \begin{matrix} & \mathbf{SR}_1 & \cdots & \mathbf{SR}_v & \cdots & \mathbf{SR}_f \\ \begin{matrix} \mathbf{SR}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{SR}_v \\ \vdots \\ \mathbf{SR}_f \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & \cdots & \tilde{x}_{1v} & \cdots & \tilde{x}_{1f} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{x}_{v1} & \cdots & 0 & \cdots & \tilde{x}_{vf} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{f1} & \cdots & \tilde{x}_{fv} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{M}_a = \begin{bmatrix} 0 & x_{12}^a & \cdots & x_{1f}^a \\ x_{21}^a & 0 & \cdots & x_{2f}^a \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ x_{f1}^a & x_{f2}^a & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

$$M_b = \begin{bmatrix} 0 & x_{12}^b & \cdots & x_{1f}^b \\ x_{21}^b & 0 & \cdots & x_{2f}^b \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ x_{f1}^b & x_{f2}^b & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad M_c = \begin{bmatrix} 0 & x_{12}^c & \cdots & x_{1f}^c \\ x_{21}^c & 0 & \cdots & x_{2f}^c \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ x_{f1}^c & x_{f2}^c & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, $[x_{f1}^a, x_{f1}^b, x_{f1}^c]$ 表示为设计需求 f 与需求 1 之间满足为三角模糊数形式的影响值。

基于行向量的最大和作为归一化的基础, 实现 M_p 的归一化, 从而构造归一化影响矩阵 N_p , 其中 $\tilde{y}_{vq} = \tilde{x}_{vq} / \text{Maxval}$, 定义如式(17)和式(18)所示。

$$\text{Maxval} = \max_{v=1}^f \left(\sum_{q=1}^f x_{vq}^c \right) \quad (17)$$

$$N_p = (\tilde{y}_{vq}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\tilde{x}_{12}}{\text{Maxval}} & \cdots & \frac{\tilde{x}_{1f}}{\text{Maxval}} \\ \frac{\tilde{x}_{21}}{\text{Maxval}} & 0 & \cdots & \frac{\tilde{x}_{2f}}{\text{Maxval}} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\tilde{x}_{f1}}{\text{Maxval}} & \frac{\tilde{x}_{f2}}{\text{Maxval}} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

步骤 B3: 通过式(19)和式(20)对归一化影响矩阵 N_p 进行处理来获取模糊综合影响矩阵用 \tilde{T} [31]。

$$\tilde{T} = \lim_{k \rightarrow \infty} (N_p + N_p^2 + N_p^3 + \cdots + N_p^k) = N_p (I - N_p)^{-1} \quad (19)$$

$$\tilde{T} = (\tilde{t}_{vq}) = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{t}_{12} & \cdots & \tilde{t}_{1f} \\ \tilde{t}_{21} & 0 & \cdots & \tilde{t}_{2f} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{t}_{f1} & \tilde{t}_{f2} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中, N_p 为规范化影响矩阵; I 为单位矩阵。

此时, 利用式(21)对矩阵 \tilde{T} 去模糊化 [31], 获得具有清晰数形式的综合影响矩阵 $T = [t_{vq}]_{f \times f}$ 。

$$t_{vq} = \frac{(t_{vq}^a + 4t_{vq}^b + t_{vq}^c)}{6} \quad (21)$$

步骤 B4: 基于综合影响矩阵 T , 计算得出各个需求的影响度 D_v (矩阵中每行数值之和) 和被影响度 C_v (矩阵每列数值之和), 从而得到中心度 M_v 和原因度 R_v , 如式(22)和式(23)所示。如果需求的原因度为正, 表示该需求对其他需求有影响, 属于原因组; 如果需求的原因度为负, 表示受到其他需求的影响, 属于效果组。

$$M_v = D_v + C_v = \sum_{q=1}^f t_{vq} + \sum_{q=1}^f t_{qv} \quad (22)$$

$$R_v = D_v - C_v = \sum_{q=1}^f t_{vq} - \sum_{q=1}^f t_{qv} \quad (23)$$

此外, 根据式(24)计算需求的影响重要度, 进而快速定位于中心度高且属于原因组的需求。

$$w_v = D_v + C_v / \sum_{v=1}^f D_v + C_v \quad (24)$$

2.4 可持续设计需求的交互影响关系排序

如式(25)所示, 以往研究通过构造相对协调系数 η 来分配模糊 Kano 模型的影响重要度 w_v 和模糊 DEMATEL 的初始权重 ω_v , 进而求解可持续设计需求的综合权重 [32], 但忽略了需求间的内在影响关系对初始权重的影响。针对该问题, 通过构建需求影响关系有向图来分析需求间的多重影响及其影响路径, 继而形成有效且可靠的需求排序结果。

$$CRW_v = \eta \times \omega_v + (1 - \eta) \times w_v \quad (25)$$

首先, 基于初始评价矩阵来构建需求之间的影响关系有向图, 如图 4 所示。其中, 图中圆形框描述各个与 SR_1 相关联的需求节点以及对应的初始权重 ω_v , 有向边则可以表示为需求之间的影响关系。同时, 基于综合影响矩阵 T 中需求 SR_v 和 SR_q 之间的影响值作为需求有向边的影响强度 IS_{vq} 。另外, 设置需求初始权重的阈值, 避免过多的需求节点会加剧整个有向图的计算规模。

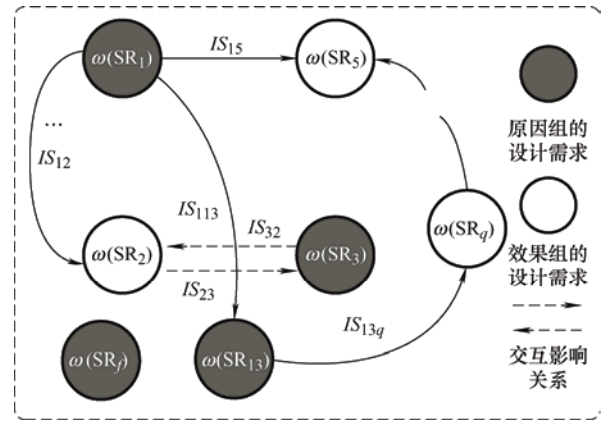


图4 可持续设计需求之间的影响关系有向图

接着, 基于需求的影响关系有向图, 以及有向边上的影响强度, 构建出设计需求的影响关系集成矩阵, 如表 3 所示。在该矩阵中, 对角线分别表示的是各个需求的影响重要度 w_v , 其中负值表示需求之间存在负相关性, 否则为正相关性。

表3 设计需求的影响关系集成矩阵

需求	SR ₁	SR ₂	...	SR _v	...	SR _f
SR ₁	w_1	IS_{12}	...	IS_{1f}	...	IS_{1e}
SR ₂	IS_{21}	w_2	...	IS_{2f}	...	IS_{2e}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
SR _v	IS_{v1}	IS_{v2}	...	w_v	...	IS_{vf}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
SR _f	IS_{f1}	IS_{f2}	...	IS_{fv}	...	w_f

最后, 基于表 3 将需求的影响重要度集成到初始权重修正过程中, 即考虑了需求直接影响对初始权重的影响, 也考虑了需求间接影响对需求权重的促进或抑制(即正负相关性), 以此构建需求的综合权重函数, 如式(26)所示。

$$SRW_v = \omega_v + \sum_{q=1, q \neq v}^m w_q IS_{qv} + \sum_{q, q \neq v} \sum_{\delta, \delta \neq v} (w_v w_e) IS_{qv} IS_{\delta v} + \dots + \sum_{q, q \neq v} \sum_{\delta, \delta \neq v} \dots \sum_{\chi, \chi \neq v} (w_q w_\delta \dots w_\chi) IS_{qv} IS_{\delta v} \dots IS_{\chi v} \quad (26)$$

式中, ω_v 表示为可持续设计需求 v 的初始权重, IS_{qv} 表示为需求 q 对需求 v 的影响强度, w_q 表示需求 q 的影响重要度。另外, 式中各个子部分的定义如下: (1) 第一个子部分的值表示为所求目标需求 i 的初始权重, 是需求综合权重的基础; (2) 在第二子部分中, 表示任何一个需求对目标需求 i 存在直接影响关系的影响效用值, 用于提高或降低需求在整体设计过程的重要性; (3) 在第三个子部分中, 表示任何两个串联需求对目标需求 i 存在间接影响关系的影响效用值; (4) 同理可得到其他剩余多个串联需求对目标需求权重的影响效用值。

3 案例分析

冰箱作为常见的制冷家用电器, 其可持续性一直受到消费者和制造企业的关注。如何评估影响冰箱可持续性的设计需求并减小冰箱设计对环境的影响是迫切需要解决的问题^[33], 实现在冰箱早期设计阶段深度剖析用户对于可持续设计需求的偏好。

3.1 家用冰箱可持续设计需求的评价数据集成

图 5 为冰箱的 13 个可持续设计需求, 表 4 为可持续设计需求的内容, 并基于模糊 Kano 调查问卷, 15 位专业用户^[34]对可持续设计需求进行评估, 在此基础上, 构造各个设计需求的评价矩阵。

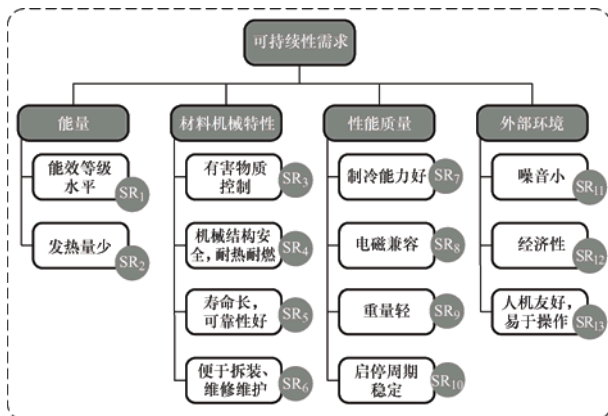


图 5 冰箱的可持续设计需求

表 4 可持续设计需求内容

类别	序号	描述
能量	SR ₁	一套衡量产品是否节能的能效等级评价标准, 等级越高, 产品能效性能越好
	SR ₂	冰箱在工作过程中由于压缩机等部件释放出的热能耗尽量少
材料机械特性	SR ₃	冰箱零部件中存在微量有害物质, 但有害物质含量需符合法律法规
	SR ₄	机械结构安全性好, 避免部分零件失效造成点
	SR ₅	产品使用寿命长, 具有较强鲁棒性
	SR ₆	可以在装配和维护阶段减少碳排放
性能质量	SR ₇	满足功能需求, 保证冰箱内部温度满足需求, 同时减少能耗
	SR ₈	符合电磁兼容标准, 对在其电磁环境中的设备或人产生尽可能小的电磁干扰
	SR ₉	产品质量小, 尽可能在储藏或运输过程中产生较小的碳排放
	SR ₁₀	冰箱压缩机工作一次达到设定温度后停止到下一次开始工作的时间, 反映了耗能情况
外部环境	SR ₁₁	压缩机等部件工作时产生噪音, 较小的噪声对人、社会和环境更加友好
	SR ₁₂	较低的成本和较高的性价比
	SR ₁₃	功能操作符合人体工程学, 操作界面清晰明晰

首先, 以需求能耗等级高 SR₁ 为例, 得到调查矩阵 P 和 N , 以 15 份问卷内容为例进行计算和说明, 调查矩阵 P 和 N 分别如表 5 和表 6 所示。

表 5 多个用户关于 SR₁ 的调查矩阵 P

用户	问题				
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
R ₁	0.4	0.6	0	0	0
R ₂	0.5	0.5	0	0	0
R ₃	0	0.9	0.1	0	0
R ₄	0.2	0.8	0	0	0
R ₅	0.8	0.2	0	0	0
R ₆	1	0	0	0	0
R ₇	0.4	0.4	0.2	0	0
R ₈	0.2	0.8	0	0	0
R ₉	0	0.6	0.4	0	0
R ₁₀	0.9	0.1	0	0	0
R ₁₁	0.5	0.5	0	0	0
R ₁₂	0.3	0.5	0.2	0	0
R ₁₃	0.3	0.4	0.3	0	0
R ₁₄	0.3	0.7	0	0	0
R ₁₅	0.5	0.5	0	0	0

表 6 多个用户关于 SR_1 的调查矩阵 N

用户	问题				
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
R_1	0	0	0	0	1
R_2	0	0	0	0.2	0.8
R_3	0	0	0	0.1	0.9
R_4	0	0	0	0.1	0.9
R_5	0	0	0	0.2	0.8
R_6	0	0	0	0	1
R_7	0	0	0.3	0.2	0.5
R_8	0	0	0.5	0.5	0
R_9	0	0	0	0.2	0.8
R_{10}	0	0	0.5	0.5	0
R_{11}	0	0	0	0.4	0.6
R_{12}	0	0	0.2	0.1	0.7
R_{13}	0	0	0.4	0.6	0
R_{14}	0	0	0	0	1
R_{15}	0	0.5	0	0.5	0

接着, 经过步骤 A1-A3 获取需求的可能度向量 Y , 并形成多用户可能度矩阵 T_{SR} , 需求 SR_1 的可能度矩阵如表 7 所示。

表 7 可持续设计需求 SR_1 的可能度矩阵

用户	Kano 类别				
	M	O	A	I	R
R_1	0	0	0	0	1
R_2	0	0	0	0.1	0.9
R_3	0	0	0	0.1	0.9
R_4	0	0	0	0.08	0.92
R_5	0	0	0	0.04	0.96
R_6	0	0	0	0	1
R_7	0	0	0	0.3	0.7
R_8	0	0	0	0.8	0.2
R_9	0	0	0	0.2	0.8
R_{10}	0	0	0	0.1	0.9
R_{11}	0	0	0	0.2	0.8
R_{12}	0	0	0	0.21	0.79
R_{13}	0	0	0	0.7	0.3
R_{14}	0	0	0	0	1
R_{15}	0	0	0	0.5	0.5

根据式(9)和式(10)得到 SR_1 下不同用户的可信度分布: $\gamma(SR_1)=[0.069\ 3, 0.071\ 4, 0.071\ 4, 0.071\ 0, 0.070\ 2, 0.069\ 2, 0.072\ 6, 0.035\ 7, 0.072\ 8, 0.071\ 4, 0.072\ 8, 0.072\ 9, 0.045\ 8, 0.069\ 2, 0.064\ 2]$ 。同理, 形成各个需求下不同用户的可信度分布, 如图 6 所示。

图 6 可知, 各个需求中不同用户之间的可信度是不一致的, 说明用户对于不同设计需求的评价结果是不确定的。例如图中用户 R_1 、 R_3 、 R_4 、 R_5 、 R_{11} 、 R_{12} 的评价信息波动较为稳定, 进而说明其给出的评

价数据的说服力强。此外, 如 R_2 和 R_8 在不同需求下的可信度波动较大, 例如 SR_{13} 中 R_2 可信度为 0.020 1, 而在 SR_3 中可信度为 0.081 8, 说明该用户对不同设计需求的认知是存在差异性的, 以及 R_9 , R_8 , R_{13} , R_{14} 和 R_{15} 等用户的可能度评估波动均较大。

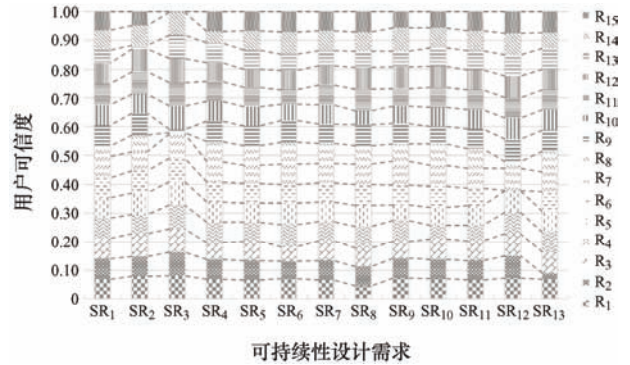


图 6 不同可持续设计需求下各个用户的可信度分布情况

随后, 基于用户的可信度分布和式(11)集成得到各个需求下多用户的可能度向量, 如表 8 所示。

表 8 可持续设计需求的可能度集成向量

可持续设计需求	Kano 类别				
	M	O	A	I	R
SR_1	0	0	0	0.106	0.894
SR_2	0	0	0.009	0.317	0.674
SR_3	0.001	0.002	0.002	0.043	0.952
SR_4	0	0	0	0.100	0.900
SR_5	0	0	0	0.152	0.848
SR_6	0	0	0	0.420	0.580
SR_7	0.002	0	0	0.058	0.940
SR_8	0	0	0.037	0.576	0.382
SR_9	0	0	0.025	0.452	0.523
SR_{10}	0	0	0	0.274	0.726
SR_{11}	0	0	0	0.106	0.880
SR_{12}	0	0	0	0.198	0.802
SR_{13}	0	0	0.004	0.196	0.800

最后, 基于式(12)和式(13)得到需求的初始权重为: $\omega_1=0.088$, $\omega_2=0.065$, $\omega_3=0.096$, $\omega_4=0.089$, $\omega_5=0.082$, $\omega_6=0.064$, $\omega_7=0.096$, $\omega_8=0.055$, $\omega_9=0.056$, $\omega_{10}=0.071$, $\omega_{11}=0.087$, $\omega_{12}=0.077$, $\omega_{13}=0.076$ 。由上可知, 在冰箱设计过程中, 顾客对于冰箱设计的最为关注的前五个可持续设计需求为: 部件有害物质少(SR_3)、制冷能力好(SR_7)、机械结构安全、材料耐热耐燃(SR_4)、能效等级水平(SR_1)和噪音小(SR_{11})。

3.2 基于模糊 DEMATEL 的家用冰箱可持续设计需求影响关系分析

基于 2.3 节中提出的模糊 DEMATEL 模型用于分析可持续设计需求的影响重要度和影响关系, 具体步骤如下。

首先, 以专家 1 为例, 构建评估需求影响关系的初始评价矩阵 IM_1 , 具体内容如下所示

$$IM_1 = \begin{matrix} \begin{matrix} SR_1 \\ SR_2 \\ SR_3 \\ SR_4 \\ SR_5 \\ SR_6 \\ SR_7 \\ SR_8 \\ SR_9 \\ SR_{10} \\ SR_{11} \\ SR_{12} \\ SR_{13} \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & H & N & N & L & N & L & N & N & N & N & L & N \\ M & 0 & N & N & L & N & M & N & N & N & N & N & N \\ N & N & 0 & H & N & N & N & N & N & N & N & M & N \\ N & N & H & 0 & L & L & N & M & N & N & N & N & L \\ N & L & N & L & 0 & N & N & L & N & N & N & N & N \\ N & N & N & L & M & 0 & N & N & L & N & N & N & L \\ H & M & L & N & N & N & 0 & N & N & L & N & N & N \\ N & N & N & N & N & N & N & 0 & N & N & N & N & M \\ N & N & N & N & N & L & N & N & 0 & N & N & N & N \\ L & L & N & N & N & N & M & N & N & 0 & N & N & N \\ N & N & N & N & N & N & N & N & N & M & 0 & N & L \\ N & N & M & L & N & L & L & M & N & N & N & 0 & N \\ N & N & N & N & N & N & N & N & M & N & L & L & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

接着, 基于步骤 B1-B2 构建多用户的模糊直接影响关系矩阵, 并通过式(15)~(17)定义出归一化影响矩阵 N_p , 并计算得到 $Maxval=6.833$ 。于是, 通过

式(19)~(21)获取去模糊化后的综合影响矩阵 T , 结果如下

$$T = \begin{bmatrix} 0.141 & 0.234 & 0.114 & 0.170 & 0.195 & 0.124 & 0.230 & 0.137 & 0.119 & 0.171 & 0.126 & 0.198 & 0.152 \\ 0.213 & 0.135 & 0.111 & 0.183 & 0.209 & 0.130 & 0.225 & 0.127 & 0.117 & 0.150 & 0.123 & 0.178 & 0.149 \\ 0.119 & 0.119 & 0.078 & 0.185 & 0.163 & 0.120 & 0.141 & 0.106 & 0.094 & 0.107 & 0.097 & 0.132 & 0.155 \\ 0.155 & 0.163 & 0.147 & 0.147 & 0.229 & 0.160 & 0.170 & 0.155 & 0.139 & 0.140 & 0.126 & 0.159 & 0.200 \\ 0.226 & 0.209 & 0.137 & 0.247 & 0.181 & 0.185 & 0.232 & 0.200 & 0.136 & 0.198 & 0.168 & 0.193 & 0.189 \\ 0.156 & 0.147 & 0.122 & 0.224 & 0.248 & 0.112 & 0.171 & 0.140 & 0.149 & 0.149 & 0.128 & 0.159 & 0.201 \\ 0.260 & 0.244 & 0.151 & 0.208 & 0.234 & 0.146 & 0.166 & 0.170 & 0.131 & 0.211 & 0.139 & 0.209 & 0.171 \\ 0.172 & 0.172 & 0.111 & 0.185 & 0.199 & 0.130 & 0.161 & 0.110 & 0.120 & 0.155 & 0.125 & 0.183 & 0.213 \\ 0.145 & 0.145 & 0.116 & 0.180 & 0.195 & 0.180 & 0.152 & 0.130 & 0.091 & 0.131 & 0.120 & 0.167 & 0.184 \\ 0.221 & 0.229 & 0.122 & 0.219 & 0.229 & 0.142 & 0.243 & 0.167 & 0.120 & 0.131 & 0.152 & 0.194 & 0.167 \\ 0.152 & 0.153 & 0.109 & 0.192 & 0.207 & 0.129 & 0.168 & 0.153 & 0.110 & 0.180 & 0.099 & 0.155 & 0.203 \\ 0.223 & 0.213 & 0.179 & 0.237 & 0.246 & 0.166 & 0.212 & 0.180 & 0.134 & 0.168 & 0.158 & 0.147 & 0.194 \\ 0.142 & 0.158 & 0.135 & 0.201 & 0.191 & 0.140 & 0.173 & 0.160 & 0.162 & 0.129 & 0.156 & 0.147 & 0.130 \end{bmatrix}$$

最后, 计算出相应需求的影响度、被影响度, 并基于式(22)~(24)获取需求的中心度、原因度和影响重要度, 如表 9 所示。

表 9 模糊 DEMATEL 的计算结果

需求	D_v	C_v	M_v	R_v	w_v
SR ₁	2.115	2.331	4.446	-0.216	0.080
SR ₂	2.057	2.327	4.384	-0.269	0.078
SR ₃	1.623	1.639	3.263	-0.016	0.058
SR ₄	2.096	2.582	4.678	-0.486	0.084
SR ₅	2.507	2.734	5.241	-0.226	0.094
SR ₆	2.112	1.870	3.983	0.241	0.071
SR ₇	2.447	2.449	4.896	-0.001	0.088
SR ₈	2.042	1.944	3.986	0.098	0.071
SR ₉	1.942	1.628	3.570	0.314	0.064
SR ₁₀	2.342	2.026	4.368	0.315	0.078
SR ₁₁	2.017	1.722	3.739	0.294	0.067
SR ₁₂	2.463	2.228	4.691	0.235	0.084
SR ₁₃	2.030	2.313	4.343	-0.283	0.078

随后, 构建如图 7 所示的需求因果关系图, 可以看到原因组为 SR₆, SR₈, SR₉, SR₁₀, SR₁₁ 和 SR₁₂; 效果组为 SR₁, SR₂, SR₃, SR₄, SR₅, SR₇ 和 SR₁₃。

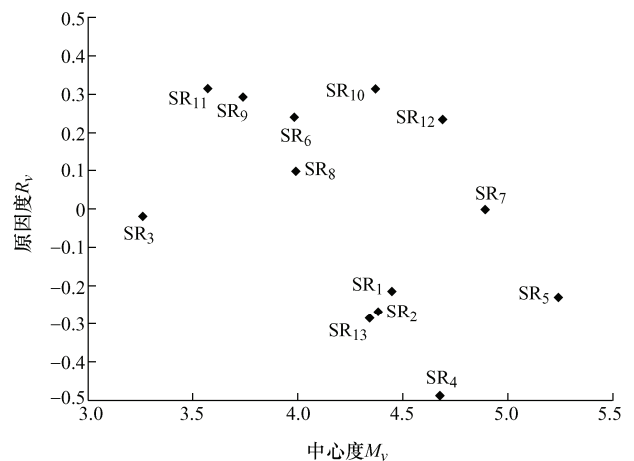


图 7 可持续设计需求之间的因果关系

其中,原因组中的需求是影响可持续设计的关键需求,如提高能效等级、发热量少等效果组中的需求,需要在产品开发中给予关注。

3.3 家用冰箱可持续设计需求的综合排序

基于综合影响矩阵 T , 获取需求有向边的影响强度 IS_{vq} , 并构建需求之间的影响关系有向图, 如图 8 所示。考虑到冰箱需求节点的有效数量, 依据影响强度的平均值^[16]来设置权重阈值为 0.07, 并剔除小于阈值的需求(分别是 SR_2 , SR_6 , SR_8 和 SR_9)。

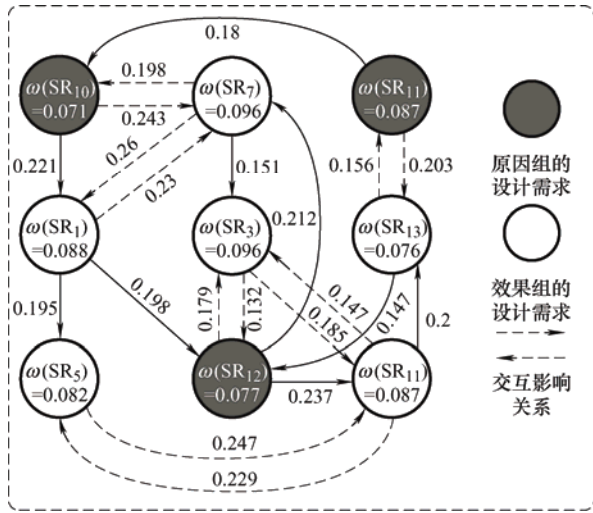


图 8 可持续设计需求的影响关系有向图

根据图 8 的影响关系有向图及需求间的影响强度, 构建出如表 10 所示的影响关系集成矩阵。另外, 为了不影响综合权重计算过程, 排除影响效用值小于 0.000 1 的项^[24,35]。

表 10 可持续设计需求的影响关系集成矩阵

SR	SR ₁	SR ₃	SR ₄	SR ₅	SR ₇	SR ₁₀	SR ₁₁	SR ₁₂	SR ₁₃
SR ₁	ω_1	—	—	0.195	0.23	—	—	-0.198	—
SR ₃	—	ω_3	0.185	—	—	—	—	-0.132	—
SR ₄	—	0.147	ω_4	0.229	—	—	—	—	0.2
SR ₅	—	—	0.247	ω_5	—	—	—	—	—
SR ₇	0.26	0.151	—	—	ω_7	-0.198	—	—	—
SR ₁₀	-0.221	—	—	—	-0.243	ω_{10}	—	—	—
SR ₁₁	—	—	—	—	—	-0.18	ω_{11}	—	-0.203
SR ₁₂	—	-0.179	-0.237	—	-0.212	—	—	ω_{12}	—
SR ₁₃	—	—	—	—	—	—	-0.156	-0.147	ω_{13}

要注意的是, 在计算多个串联需求在对目标需求的影响效用值时, 其串联需求必定是同一传递方向, 并需要考虑需求的正负相关性。例如, 设定目标需求为 SR_{13} , 与目标需求存在单个或多个串联关系的需求链: 1) $SR_4 \rightarrow SR_{13}$, 2) $SR_{11} \rightarrow SR_{13}$, 3) $SR_{12} \rightarrow SR_4 \rightarrow SR_{13}$, 4) $SR_3 \rightarrow SR_4 \rightarrow SR_{13}$, 5) $SR_1 \rightarrow$

$SR_2 \rightarrow SR_4 \rightarrow SR_{13}$, 6) $SR_3 \rightarrow SR_{12} \rightarrow SR_{14} \rightarrow SR_{13}$ 。

最后, 根据公式(26)实现了对各个需求初始权重的修正, 同时对得到综合权重值进行归一化处理, 结果是: $SRW_1(0.139) > SRW_5(0.128) > SRW_7(0.127) > SRW_3(0.117) > SRW_{13}(0.116) > SRW_4(0.112) > SRW_{11}(0.108) > SRW_{12}(0.081) > SRW_{10}(0.072)$ 。根据可持续设计需求的综合权重, 并对 DEMATEL 得到需求因果图进行更新, 如图 9 所示。其中, 图中横坐标表示的是各个需求的中心度, 而纵坐标为需求的综合权重值。

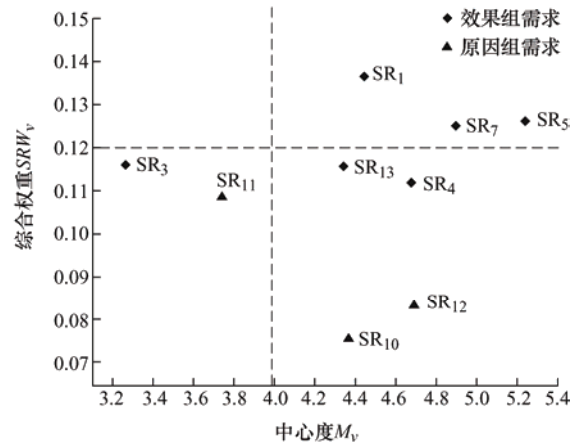


图 9 可持续设计需求重要性分析

由图可知, 原因组中的 SR_{11} (噪声小)对产品可持续设计需求的影响最大, 其次为 SR_{12} (经济性)和 SR_{10} (启停周期稳定), 符合实际市场定位。当中心度和综合权重越大时(即越靠近图的左上方), 表示需求在可持续设计中占据更大的比重, 设定中心度和综合权重的阈值分别是 4.0 和 0.12, 可以发现需求 SR_1 (能效等级高), 需求 SR_5 (寿命长, 可靠性好), 和需求 SR_7 (制冷能力好)是顾客在冰箱方案设计过程中尤为关注的设计需求, 也是市场对冰箱是否具有可持续性价值以及最大化用户满意度的前提, 可以为设计师对产品可持续开发提供有效的设计指导和需求前景分析。

3.4 需求权重结果对比及敏感性分析

通过与传统模糊 Kano 模型的需求排序求解结果作比较, 并分析不同相对协调系数对综合权重的敏感性, 验证所提需求评估模型的可靠性和有效性。

(1) 结果对比分析。与传统 Kano 比较, 对比不考虑用户可信度对初始评价数据进行修正的情况下, 探索所提改进 Kano 模型与传统 Kano 模型的初始权重变化。首先根据 3.1 节中模糊 Kano 模型求解过程得到 15 位用户关于可持续设计需求的可能度向量 Y , 通过对多个用户的可能度向量求平均值获

得某个需求的平均可能度向量, 结果如表 11 所示。

表 11 可持续设计需求平均可能度向量

用户	可能度向量
\bar{Y}_1	(0.358, 0.242, 0.179, 0.222, 0)
\bar{Y}_2	(0.219, 0.215, 0.155, 0.345, 0.062)
\bar{Y}_3	(0.222, 0.458, 0.055, 0.108, 0.155)
\bar{Y}_4	(0.405, 0.375, 0.065, 0.154, 0)
\bar{Y}_5	(0.373, 0.340, 0.154, 0.133, 0)
\bar{Y}_6	(0.171, 0.175, 0.178, 0.476, 0)
\bar{Y}_7	(0.536, 0.281, 0.066, 0.096, 0.004)
\bar{Y}_8	(0.082, 0.011, 0.291, 0.588, 0.023)
\bar{Y}_9	(0.083, 0.063, 0.306, 0.500, 0.036)
\bar{Y}_{10}	(0.310, 0.089, 0.271, 0.329, 0)
\bar{Y}_{11}	(0.282, 0.329, 0.211, 0.138, 0)
\bar{Y}_{12}	(0.216, 0.311, 0.162, 0.244, 0.053)
\bar{Y}_{13}	(0.208, 0.219, 0.318, 0.242, 0.009)

最后, 基于式(12)和式(13)计算各个需求的权重并排序, 得到需求初始权重对比结果, 如图 10 所示。可见, 基于传统 Kano 模型的需求评估结果依赖于用户的主观判断, 导致初始数据具有偏好性和波动性, 而所提改进 Kano 模型则考虑了群体一致性, 减小了可信度低的数据对整体评估结果的影响, 使需求的权重变化更稳定。其中, 以排序前五的需求进行对比, 传统 Kano 模型的计算结果为 $\omega_8=0.146\ 2>\omega_7=0.120\ 6>\omega_4=0.100\ 5>\omega_9=0.098\ 1>\omega_6=0.083\ 8$, 改进 Kano 模型的计算结果为 $\omega_3=0.096>\omega_7=0.096>\omega_4=0.089>\omega_1=0.088>\omega_{11}=0.087$ 。尽管 SR_7 和 SR_4 的排序相同, 但通过比较另外三个设计需求可以发现, 所提改进 Kano 模型更关注于有害物质控制(SR_3)、能效等级(SR_1)和噪音(SR_{11}), 而不是电磁兼容(SR_8)和重量轻(SR_9), 求解的可持续设计需求排序结果更符合冰箱的实际设计期望。

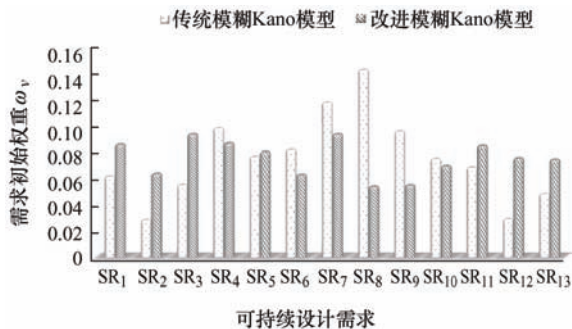


图 10 Kano 模型下的初始权重对比

(2) 敏感性分析。在改进 Kano 模型和模糊 DEMATEL 求解的初始权重和影响重要度基础上, 不考虑需求间的影响传递路径以及影响强度, 仅引入式(25)的相对协调系数 η 分配权重以求解需求的综合权重, 排序结果如表 12 所示。

表 12 基于相对协调系数 η 的综合权重值

η 取值	需求排序结果
0	$SR_5>SR_7>SR_4=SR_{12}>SR_1>SR_{13}=SR_{10}=SR_2>SR_6=SR_8>SR_{11}>SR_9>SR_3$
0.1	$SR_5>SR_7>SR_4>SR_{12}>SR_1>SR_{13}>SR_{10}>SR_2>SR_6>SR_8>SR_{11}>SR_9>SR_3$
0.3	$SR_5=SR_7>SR_4>SR_1>SR_{12}>SR_{13}>SR_{10}>SR_2>SR_{11}>SR_3>SR_6>SR_8>SR_9$
0.5	$SR_7>SR_5>SR_4>SR_1>SR_{12}>SR_{11}=SR_3=SR_{13}=SR_{10}>SR_2>SR_6>SR_8>SR_9$
0.7	$SR_7>SR_4>SR_5=SR_1>SR_3>SR_{11}>SR_{12}>SR_{13}>SR_{10}>SR_2>SR_6>SR_8>SR_9$
0.9	$SR_7>SR_3>SR_4>SR_1>SR_{11}>SR_5>SR_{12}>SR_{13}>SR_{10}>SR_2>SR_6>SR_8>SR_9$
1.0	$SR_7=SR_3>SR_4>SR_1>SR_{11}>SR_5>SR_{12}>SR_{13}>SR_{10}>SR_2>SR_6>SR_8>SR_9$

当相对协调系数 η 取不同的值时, 需求权重会产生较大的波动变化(图 11), 导致最终需求排序结果的不稳定性, 从而影响产品的可持续性价值。当 η 为 0、0.1 和 0.3 时, 偏向设计专家的最佳可持续设计需求为 SR_5 (寿命长); 当 η 为 0.5、0.7、0.9 和 1 时, 偏向用户的最佳可持续设计需求为 SR_7 (制冷能力好)。

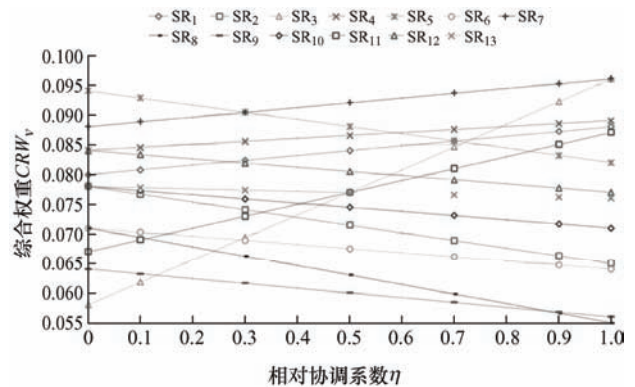


图 11 不同 η 值下需求综合权重变化分析

分配系数 η 是基于专家经验、偏好所给出的一个比例系数, 可以权衡初始权重和影响重要度。在图 11 中发现 η 的变化会导致设计需求权重出现较大的波动, 对分配系数具有较大的敏感性, 容易导致排序结果的不稳定。

综上所述, 所提方法可以得到群体一致性的评估数据, 并利用需求多重交互关系的综合权重函数获取最终结果, 验证可知, 获得的结果是稳定的, 有效降低了由于主观性带来的无效数据波动, 使求解在不同的样本下, 也能获得稳定性较强的排序结果, 使产品早期开发过程中核心可持续设计需求的

评估结果更加准确和稳定。

参 考 文 献

4 结 论

现有冰箱设计中处理可持续设计需求的方法主要是采用 TRIZ 理论和情景分析法[8]来判断需求属性, 或通过 QFD 模型[9]转化可持续设计需求为相关技术特征, 忽略了可持续设计需求之间的交互性, 以及其他影响用户体验的需求对可持续性的间接影响。因此, 在产品概念设计过程中, 如何准确地评估核心可持续设计需求, 并以用户满意度为目标进行需求重要性排序是可持续产品开发的关键一步。

针对可持续设计需求评估中存在用户评价数据不一致性以及可持续设计需求内在影响关系的问题, 提出一种集成改进模糊 Kano 模型和 DEMATEL 的可持续设计需求评估模型。通过提出修正 Kano 模型获取初始客观权重, 并考虑多重影响关系及影响路径, 利用需求影响关系有向图进行需求综合权重的推理, 在冰箱设计初期形成有效的需求排序结果。结果显示在冰箱未来的可持续设计中, 我们需要更加关注用户体验, 减少工作时产生的噪声, 并且在降低能耗比的同时保证冰箱制冷等性能的可靠性。主要内容如下所述。

(1) 基于改进模糊 Kano 模型得到用户的可能度矩阵, 充分考虑不同用户之间的可信度差异和模糊表达, 构建基于可信度模型的可能度向量集成方法, 并利用信息熵计算可持续设计需求的客观初始权重。

(2) 建立模糊 DEMATEL 模型分析可持续设计需求之间的多重影响效用, 通过获取需求间的影响强度来修正初始权重, 并构建需求之间的有向关系图。另外, 采用三角模糊数量化描述专家的主观评价信息, 减少不确定性。

(3) 通过构建基于需求影响关系有向图的综合权重函数, 有效集成初始权重和多重影响重要度, 并基于效果组和原因组充分考虑需求的内在影响和影响路径, 获取可靠的需求综合权重值。

需要指出的是, 该可持续设计需求的评估模型仍需要专家的设计经验来完成评估, 数据来源仍存在局限性。在未来工作中, 考虑借助知识图谱等智能搜索引擎直观展示海量知识与可持续设计需求的内在关系, 或建立可视化模型进行需求的快速评估。

- [1] SINGH P K, SARKAR P. A framework based on fuzzy delphi and DEMATEL for sustainable product development: A case of Indian automotive industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246(10): 118991.
- [2] 程贤福, 周健, 肖人彬, 等. 面向绿色制造的产品模块化设计研究综述[J]. 中国机械工程, 2020, 31(21): 2612-2625.
CHENG Xianfu, ZHOU Jian, XIAO Renbin, et al. Review of product modular design from perspective of green manufacturing[J]. China Mechanical Engineering, 2020 31(21): 2612-2625.
- [3] JING L T, XU Q Q, SUN T, et al. Conceptual scheme decision model for mechatronic products driven by risk of function failure propagation[J]. Sustainability, 2020, 12(17): 7134.
- [4] HE B, LIU Y, ZENG L, et al. Product carbon footprint across sustainable supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 241: 118320.
- [5] 张雷, 钟言久, 袁远, 等. 基于数据挖掘的绿色设计中客户需求向工程特性权重转化方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(2): 174-182.
ZHANG Lei, ZHONG Yanjiu, YUAN Yuan, et al. Method of transform customer demands to engineering characteristic weights in green design based on data mining[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(2): 174-182.
- [6] WATZ M, HALLSTEDT S I. Profile model for management of sustainability integration in engineering design requirements[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 247: 119155.
- [7] 张凤伟, 曹国忠, 刘帅, 等. 基于 Web 和专利统计分析的用户需求获取及预测方法研究[J]. 机械设计与制造, 2020(8): 59-63, 67.
ZHANG Fengwei, CAO Guozhong, LIU Shuai, et al. Research on user demand acquisition and prediction method based on Web and patent statistical analysis[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2020(8): 59-63, 67
- [8] 曹国忠, 石开, 王昕. 基于多维感性的用户需求分析方法研究[J]. 包装工程, 2019, 40(6): 119-127.
CAO Guozhong, SHI Kai, WANG Ting. User-requirement analysis method based on multi-dimensional sensibility[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(6): 119-127.
- [9] 张付英, 段晶莹, 陈建垒, 等. 面向产品可持续设计的

- 关键功能模块识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(7): 1828-1838.
- ZHANG Fuying, DUAN Jingying, CHEN Jianlei, et al. Critical functional modules identification method for product sustainable design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(7): 1828-1838.
- [10] BIJU P L, SHALIJ P R, PRABHUSHANKAR G V. Evaluation of customer requirements and sustainability requirements through the application of fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 108: 808-817.
- [11] MA J, KREMER G E O, RAY C D. A comprehensive end-of-life strategy decision making approach to handle uncertainty in the product design stage[J]. Research in Engineering Design, 2018, 29(3): 469-487.
- [12] SOHANI A, REZAPOUR S, SAYYAADI H. Comprehensive performance evaluation and demands' sensitivity analysis of different optimum sizing strategies for a combined cooling, heating, and power system[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 279: 123225.
- [13] CHAUDHA A, JAIN R, SINGH A R, et al. Integration of Kano's model into quality function deployment (QFD)[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 53(5-8): 689-698.
- [14] 张妮, 赵晓冬. 基于改进质量功能展开的产品可持续设计模块重要度判定[J]. 计算机集成制造系统: 2021, 27(12): 3614-3624.
- ZHANG Ni, ZHAO Xiaodong. Importance degree determination for product sustainable design modules based on improved QFD[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(12): 3614-3624.
- [15] 伍晓榕, 张树有, 裘乐淼, 等. 面向绿色制造的加工工艺参数决策方法及应用[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 91-100.
- WU Xiaorong, ZHANG Shuyou, QIU Lemiao, et al. Decision making method of process parameter selection for green manufacturing based on a DEMATEL-VIKOR algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 91-100.
- [16] 林晓华, 冯毅雄, 谭建荣, 等. 基于改进 DEMATEL-VIKOR 混合模型的产品概念方案评价[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(12): 2552-2561.
- LIN Xiaohua, FENG Yixiong, TAN Jianrong, et al. Product concept evaluation based on hybrid model of advanced DEMATEL-VIKOR algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(12): 2552-2561.
- [17] LIU Z, MING X, QIU S, et al. A framework with hybrid approach to analyse system requirements of smart PSS toward customer needs and co-creative value propositions[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 139: 105776.
- [18] DU S, LI H, SUN B. Hybrid Kano-fuzzy-DEMATEL model based risk factor evaluation and ranking of cross-border e-commerce SMEs with customer requirement[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 37(6): 8299-8315.
- [19] 耿秀丽, 邱华清. 考虑顾客满意度的顾客需求重要度确定方法[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(8): 2025-2035.
- GENG Xiuli, QIU Huaqing. Customer requirements importance degrees calculation method considering customer satisfaction[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(8): 2025-2035.
- [20] MATZLER K, HINTERHUBER H H. How to make product development projects more successful by integrating Kano's model of customer satisfaction into quality function deployment[J]. Technovation, 1998, 18(1): 25-38.
- [21] JING L T, PENG X, LI J Q, et al. A decision approach with multiple interactive qualitative objectives for product conceptual schemes based on noncooperative-cooperative game theory[J]. Advanced Engineering Informatics, 2018, 38: 581-592.
- [22] MA S, ZHANG Y, LIU Y, et al. Data-driven sustainable intelligent manufacturing based on demand response for energy-intensive industries[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274: 123155.
- [23] JIANG S F, JING L T, SUN T, et al. A conceptual scheme improvement approach based on the performance value of the principle solution taking a coal mining machine as a case study[J]. Computers in Industry, 2019, 105: 17-34.
- [24] WANG C H. Incorporating customer satisfaction into the decision-making process of product configuration: A fuzzy Kano perspective[J]. International Journal of Production Research, 2013, 51(22): 6651-6662.
- [25] ATLASON R S, STEFANSSON A S, WIETZ M, et al. A rapid Kano-based approach to identify optimal user segments[J]. Research in Engineering Design, 2018, 29(3): 459-467.
- [26] MURPHY C K. Combining belief functions when evidence conflicts[J]. Decision Support Systems, 2000,

- 29(1): 1-9.
- [27] JING L T, ZHAN Y F, LI Q Z, et al. An integrated product conceptual scheme decision approach based on Shapley value method and fuzzy logic for economic-technical objectives trade-off under uncertainty[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 156: 107281.
- [28] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1948, 27(3): 379-423.
- [29] LIN C J, WU W W. A causal analytical method for group decision-making under fuzzy environment[J]. *Expert Systems with Applications*, 2008, 34(1): 205-213.
- [30] ACUÑA-CARVAJAL F, PINTO-TARAZONA L, LÓPEZ-OSPINA H, et al. An integrated method to plan, structure and validate a business strategy using fuzzy DEMATEL and the balanced scorecard[J]. *Expert Systems with Applications*, 2019, 122: 351-368.
- [31] SANGAIAH A K, GOPAL J, BASU A, et al. An integrated fuzzy DEMATEL, TOPSIS, and ELECTRE approach for evaluating knowledge transfer effectiveness with reference to GSD project outcome[J]. *Neural Computing and Applications*, 2017, 28(1): 111-123.
- [32] HE L, WU Z, XIANG W, et al. A novel Kano-QFD-DEMATEL approach to optimise the risk resilience solution for sustainable supply chain[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(6): 1714-1735.
- [33] 张雷, 刘光复, 刘志峰, 等. 大规模定制模式下绿色设计产品信息模型研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(6): 1054-1060.
- ZHANG Lei, LIU Guangfu, LIU Zhifeng, et al. Product information model of green design for mass customization[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(6): 1054-1060.
- [34] GENG X, CHU X. A new importance-performance analysis approach for customer satisfaction evaluation supporting PSS design[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(1): 1492-1502.
- [35] DENG X, ZHENG X, SU X, et al. An evidential game theory framework in multi-criteria decision making process[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2014, 244: 783-793.
-
- 作者简介: 景立挺, 男, 1992 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为产品智能设计、概念设计决策、设计语义建模。
E-mail: jlt0805@foxmail.com
- 陈盈臣, 男, 1998 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为设计需求挖掘, 概念设计决策。
E-mail: 524021742@qq.com
- 谢静, 女, 1992 年出生, 博士, 中级工程师。主要研究方向为产品设计仿真与性能优化。
E-mail: xiejing_yang@126.com
- 谭博文, 男, 1997 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为可持续设计, 概念设计方案决策。
E-mail: 1012517114@qq.com
- 姜少飞(通信作者), 男, 1975 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为系统工程设计。
E-mail: jsf75@zjut.edu.cn