

考虑心理偏好的球型模糊质量功能展开方法研究

耿秀丽, 李逸群

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 针对质量功能展开 (quality function deployment, QFD) 中评价信息的模糊性和不确定性问题, 考虑球型模糊具有独立确定隶属度、非隶属度和犹豫度的优势, 采用球型模糊数处理专家语义评价信息, 将供应商和顾客需求映射为工程特性。针对现有模糊 QFD 分析中反模糊化造成信息损失以及没有考虑决策者心理偏好的问题, 采用 TODIM (交互式多准则决策方法葡萄牙语缩写), 考虑专家规避风险的心理偏好, 通过计算工程特性的总体优势度进行其重要度分析。为验证该方法的有效性, 以某电动汽车产品服务系统为例, 进行工程特性重要度分析、损失规避系数灵敏度分析, 并对比了不同多属性决策方法的工程特性排序结果。结果表明, 所提方法能够解决评价信息的模糊性和不确定性问题, 同时考虑了决策者风险偏好, 更符合实际决策情境。

关键词: 质量控制; 质量功能展开; 质量屋; 球型模糊集; TODIM; 工程特性

中图分类号: N 94

文献标志码: A

Methodology research for spherical fuzzy quality function deployment considering psychological preferences

GENG Xiuli, LI Yiqun

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Quality function deployment (QFD) is a commonly used demand-driven solution design method and tool. To solve the fuzziness and uncertainty of evaluation information in QFD, spherical fuzzy was considered as it has the advantage of independently determining membership degree, non-membership degree and hesitation degree. Spherical fuzzy numbers were used to process expert semantic evaluation information, and the needs of suppliers and customers were mapped to engineering characteristics. To address the information loss problem due to inverse fuzzification in the existing fuzzy QFD analysis and the failure to consider the psychological preferences of decision makers, TODIM (Portuguese acronym for interactive multi-criteria decision-making) method was adopted to consider the psychological preferences of experts for risk avoidance and perform their importance analysis by calculating the overall dominance of engineering characteristics. In order to verify the effectiveness of the method, an electric vehicle product service system was used as an example to conduct the importance analysis of engineering characteristics, sensitivity analysis of loss avoidance coefficient, and

收稿日期: 2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72271164); 教育部人文社会科学研究规划基金资助项目 (19YJA630021)

第一作者: 耿秀丽 (1984-), 女, 教授。研究方向: 产品服务系统、服务科学、决策理论与方法等。E-mail: xiuli_forever@163.com

to compare the results of ranking engineering characteristics of different multi-attribute decision methods. The results show that the proposed method can deal with the ambiguity and uncertainty of evaluation information, while taking into account of the risk preferences of decision makers, and is more consistent with the actual decision context.

Keywords: *quality control; quality function deployment; house of quality; spherical fuzzy sets; TODIM; engineering characteristics*

产品服务系统 (product-service system, PSS) 是一种企业负责在产品全生命周期服务内形成的产品与服务高度集成的生产系统, 其设计核心是如何依据顾客需求进行工程方案设计。质量功能展开 (quality function deployment, QFD) 是常用的需求驱动型方案设计方法和工具, 其核心质量屋 (house of quality, HoQ) 能够有效识别顾客需求并映射到工程特性中^[1]。针对传统 QFD 计算方法无法处理信息中的模糊性和不确定性的问题, 常采用模糊 QFD 方法, 但未考虑决策者犹豫状态, 与现实情况不符。球型模糊集 (spherical fuzzy sets, SFS)^[2] 为参数提供较广的取值范围, 可对犹豫度参数赋值, 所以本文提出球型模糊 QFD 方法以考虑专家决策犹豫度。

现有模糊 QFD 的计算方法大多采用得分值等反模糊化方法、相对偏好分析法和多属性决策法。反模糊化方法和相对偏好分析法的原理是将模糊信息转化为精确值, 该过程难免会造成部分信息损失。常用多属性决策方法, 如 TOPSIS, 未考虑决策者风险心理偏好, 该方法缺少心理偏好因数, 进而缺少对结果的修正。因此, 本文将多属性决策方法 TODIM (交互式多准则决策方法葡萄牙语缩写) 引入球型模糊 QFD, 考虑专家心理偏好, 间接得到需求权重, 并计算工程特性重要度。

1 文献综述

传统 QFD 常用 {1,3,5} 等精确数评分系统, 无法描述信息的模糊性和不确定性。模糊集是常用的不确定信息的处理工具, 已广泛应用于 QFD 分析, 可以处理决策者语义评价信息的模糊性和不确定性^[3]。

在实践应用中, 为了描述不同类型问题中的模糊不确定性与决策者的犹豫性, 学者们从不同角度对模糊 QFD 进行推广。相继出现了直觉模糊

集^[4]、勾股模糊集^[5]、区间二型模糊集^[6] 等多种形式的模糊集与 QFD 结合的计算。Haktanir 等^[7] 采用区间勾股模糊 QFD 衡量设计需求和顾客需求的优先度, 以克服光伏太阳能产品服务系统成本高、效率低的问题。张妮等^[8] 利用犹豫模糊语言集表征 QFD 中需求和模块的关联关系。Liu 等^[9] 在传统模糊集的基础上拓展出区间二类模糊集, 更精确地描述顾客需求和工程特性关联度的专家评价信息。常见模糊集, 如直觉模糊集, 未考虑专家决策时的犹豫状态。犹豫模糊集虽能表达犹豫度函数, 但是隶属度、非隶属度和犹豫度之和为 1, 且犹豫度函数与语言术语个数相关^[10], 与现实中很多情况不符。Kutlu Gündoğdu 等^[2] 于 2019 年提出了球型模糊集, 对普通模糊集进行了拓展, 目前鲜有 SFS 与 QFD 结合计算的研究。

球型模糊集为决策者提供了一个三维球面偏好域, 可在球面区间内定义隶属度、非隶属度和犹豫度, 这使得 3 个参数的平方和介于 0~1 之间, 为每个参数提供了更广阔的值域。球型模糊集不仅能将语义评价转化为模糊数, 而且对于决策者而言, 3 个参数的取值更加灵活。既拓展了球型模糊 QFD 的使用空间, 又能够用犹豫度表征专家决策评价时的犹豫状态, 这是球型模糊集区别于其他模糊集的显著特征^[11]。Kutlu Gündoğdu 等^[12] 利用球型模糊集表示机器人客户需求重要性等级, 对其进行设计评估。Yu 等^[13] 提出了球型模糊集层次分析法, 对供应链壁垒进行评分。基于球型模糊集的优势与应用成果, 本文提出了球型模糊 QFD 方法。

现有模糊 QFD 的计算方法大多采用得分值法等直接反模糊化方法, 相对偏好关系分析等间接方法计算工程特性的重要度, 或者采用多属性决策方法对工程特性进行排序。杨强等^[14] 采用直觉模糊集 (IFS) 得分值排序法, 将顾客需求综合重要度直觉模糊集转化为综合重要度精确得分值。耿

秀丽等^[15]采用相对偏好关系将每个三角模糊数转化为精确数值，分析计算两组三角模糊数的乘积，得到产品服务系统模块属性相对重要度。但模糊信息转化过程中难免会造成部分信息损失^[16]。官华萍等^[17]提出一种结合犹豫二元语义变量、AHP 和 TOPSIS 的改进 QFD 模型，确定数字学习系统的质量特性重要度。上述 3 类方法均未考虑模糊 QFD 信息获取和处理中决策者风险规避的心理因素。

Gomes 等^[18]在 1991 年提出了 TODIM 方法，通过改变损失规避系数 θ 的取值，可以考虑决策者应对风险的态度。Singh 等^[19]考虑决策者置信水平，研究基于 TODIM 的汽车零部件供应商选择方法。孙延浩等^[20]针对软件质量方法中未考虑决策者心理行为的问题，提出基于 TODIM 的软件质量评价模型。Wu 等^[21]利用熵权广义 TODIM 方法计算股票之间的优势关系，反映投资者的有限理性行为。

TODIM 的核心是通过计算每个方案与其他方案之间的优势度，然后利用优势度来计算每个方案的前景值，由前景值的大小对所有方案进行排序^[22]。将 TODIM 引入 QFD 方法中，通过计算需求总优势度，可以得到供应商和顾客需求的相对优势排序，并转化为供应商和顾客需求权重。进而通过供应商和顾客需求的相对权重计算每个工程特性的相对优势度，最终得到工程特性重要度。一方面，TODIM 确定需求权重解决了球型模糊数无法进行除法计算的问题，同时避免了模糊信息的转化；另一方面，在需求权重和工程特性排序两个阶段都考虑了决策者的风险态度。

在上述背景下，本文将模糊 QFD 与 TODIM 结合，用于表达决策者对供应商和顾客需求的评价，并在考虑决策者心理偏好的条件下，将之与工程特性相对应，计算得到工程特性重要度。球型模糊 QFD 将专家评价语义转化为球型模糊数，既能表征决策者评价信息的模糊性和不确定性，又能针对参数灵活取值，便于后续计算。随后利用 TODIM 方法考虑决策者心理偏好，计算供应商和顾客需求重要度，进而通过归一化方法得到供应商和顾客需求权重，再次利用 TODIM 方法分别计算每个工程特性相对于其他工程特性的优势度，并计算总体优势度，最终得到工程特性排序。

2 球型模糊的定义及运算

球型模糊集是 Kutlu Gündoğdu 等^[2]在 2019 年提出的，它是具有三维隶属度函数的普通模糊集的所有扩展，如直觉模糊集(intuitionistic fuzzy sets, IFS)、第二类直觉模糊集(intuitionistic fuzzy sets of second type, IFS2)和中性模糊集(neutrosophic fuzzy sets, NFS)，用更详细的描述定义决策者的判断。这种新型的模糊集基于文献中已经定义的球型模糊集，开发了聚合算子、分数和精度函数。

球型模糊集中，在隶属度、非隶属度和犹豫参数的平方和属于 $[0,1]$ 的同时，决策者的犹豫度可以独立于隶属度和非隶属度来定义在 $0\sim 1$ 之间。图 1 说明了 IFS, IFS2, NFS 和 SFS 之间的差异性。

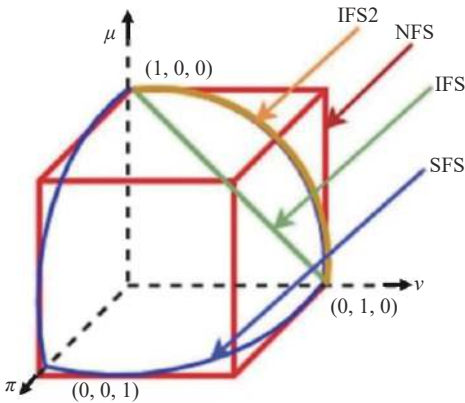


图 1 IFS, IFS2, NFS 和 SFS 的几何表示^[2]
Fig.1 Geometric representations of IFS, IFS2, NFS and SFS

定义 1 球型模糊集(SFS)

$\tilde{A}_S$ 为论域 U 上的球型模糊集

$$\tilde{A}_S = \left\{ u, \left(\mu_{\tilde{A}_S}(u), v_{\tilde{A}_S}(u), \pi_{\tilde{A}_S}(u) \right) \middle| u \in U \right\}$$

即

$$\mu_{\tilde{A}_S} : U \in [0,1], v_{\tilde{A}_S} : U \in [0,1], \pi_{\tilde{A}_S} : U \in [0,1]$$

且满足

$$0 \leq \mu_{\tilde{A}_S}^2(u) + v_{\tilde{A}_S}^2(u) + \pi_{\tilde{A}_S}^2(u) \leq 1, \quad \forall u \in U$$

对于每一个 u ，数值 $\mu_{\tilde{A}_S}(u)$, $v_{\tilde{A}_S}(u)$ 和 $\pi_{\tilde{A}_S}(u)$ 分别是 u 对 $\tilde{A}_S$ 的隶属度、非隶属度和犹豫度。

球型模糊数的基础运算规则如下：

$$\tilde{A}_S \oplus \tilde{B}_S = \left\{ \left(\mu_{\tilde{A}_S}^2 + \mu_{\tilde{B}_S}^2 - \mu_{\tilde{A}_S}^2 \mu_{\tilde{B}_S}^2 \right)^{1/2}, v_{\tilde{A}_S} v_{\tilde{B}_S}, \left[\left(1 - \mu_{\tilde{B}_S}^2 \right) \pi_{\tilde{A}_S}^2 + \left(1 - \mu_{\tilde{A}_S}^2 \right) \pi_{\tilde{B}_S}^2 - \pi_{\tilde{A}_S}^2 \pi_{\tilde{B}_S}^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \widetilde{A}_S \otimes \widetilde{B}_S = & \left\{ \mu_{\widetilde{A}_S} \mu_{\widetilde{B}_S}, \left(v_{\widetilde{A}_S}^2 + v_{\widetilde{B}_S}^2 - v_{\widetilde{A}_S}^2 v_{\widetilde{B}_S}^2 \right)^{1/2}, \right. \\ & \left. \left[\left(1 - v_{\widetilde{B}_S}^2 \right) \pi_{\widetilde{A}_S}^2 + \left(1 - v_{\widetilde{A}_S}^2 \right) \pi_{\widetilde{B}_S}^2 - \pi_{\widetilde{A}_S}^2 \pi_{\widetilde{B}_S}^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda \cdot \widetilde{A}_S = & \left\{ \sqrt{1 - \left(1 - \mu_{\widetilde{A}_S}^2 \right)^\lambda}, v_{\widetilde{A}_S}^\lambda, \right. \\ & \left. \sqrt{\left(1 - \mu_{\widetilde{A}_S}^2 \right)^\lambda - \left(1 - \mu_{\widetilde{A}_S}^2 - \pi_{\widetilde{A}_S}^2 \right)^\lambda} \right\}, \lambda > 0 \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \widetilde{A}_S^\lambda = & \left\{ \mu_{\widetilde{A}_S}^\lambda, \sqrt{1 - \left(1 - v_{\widetilde{A}_S}^2 \right)^\lambda}, \right. \\ & \left. \sqrt{\left(1 - v_{\widetilde{A}_S}^2 \right)^\lambda - \left(1 - v_{\widetilde{A}_S}^2 - \pi_{\widetilde{A}_S}^2 \right)^\lambda} \right\}, \lambda > 0 \quad (4) \end{aligned}$$

球面上球型模糊集 $\widetilde{A}_S$ 和 $\widetilde{B}_S$ 的球面距离计算公式如下:

$$\begin{aligned} D(\widetilde{A}_S, \widetilde{B}_S) = & \arccos \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[\left(\mu_{\widetilde{A}_S}^2 - \mu_{\widetilde{B}_S}^2 \right)^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. \left(v_{\widetilde{A}_S}^2 - v_{\widetilde{B}_S}^2 \right)^2 + \left(\pi_{\widetilde{A}_S}^2 - \pi_{\widetilde{B}_S}^2 \right)^2 \right] \right\} \quad (5) \end{aligned}$$

定义系数 $\frac{2}{\pi}$ 使得球型模糊数之间的球面距离为 $[0, 1]$, 而不是 $\left[0, \frac{2}{\pi}\right]$, 又因为 $\mu_{\widetilde{A}_S}^2(u) + v_{\widetilde{A}_S}^2(u) + \pi_{\widetilde{A}_S}^2(u) = 1$, 可以化简得到:

$$\begin{aligned} D(\widetilde{A}_S, \widetilde{B}_S) = & \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^n \arccos \left[\mu_{\widetilde{A}_S}(u_i) \mu_{\widetilde{B}_S}(u_i) + \right. \\ & \left. v_{\widetilde{A}_S}(u_i) v_{\widetilde{B}_S}(u_i) + \pi_{\widetilde{A}_S}(u_i) \pi_{\widetilde{B}_S}(u_i) \right] \quad (6) \end{aligned}$$

该公式可用于 TODIM 中, 计算两个球型模糊数之间的距离。

定义 2 球型加权算术平均 (spherical weighted arithmetic mean, SWAM)

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n); w_i \in [0, 1]; \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

$$\begin{aligned} M_w(A_{S1}, A_{S2}, \dots, A_{Sn}) = & w_1 A_{S1} + w_2 A_{S2} + \dots + w_n A_{Sn} = \\ & \left\{ \sqrt{1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{A_{Si}}^2)^{w_i}}, \prod_{i=1}^n v_{A_{Si}}^{w_i}, \right. \\ & \left. \sqrt{\prod_{i=1}^n (1 - \mu_{A_{Si}}^2)^{w_i} - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_{A_{Si}}^2 - \pi_{A_{Si}}^2)^{w_i}} \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

定义 3 球型模糊集的分数函数和精度函数定义如下:

分数函数

$$V_{\text{score}}(\widetilde{A}_S) = (\mu_{\widetilde{A}_S} - \pi_{\widetilde{A}_S})^2 - (v_{\widetilde{A}_S} - \pi_{\widetilde{A}_S})^2 \quad (8)$$

精度函数

$$T_{\text{accuracy}}(\widetilde{A}_S) = \mu_{\widetilde{A}_S}^2 + v_{\widetilde{A}_S}^2 + \pi_{\widetilde{A}_S}^2 \quad (9)$$

当 $V_{\text{score}}(\widetilde{A}_S) < V_{\text{score}}(\widetilde{B}_S)$ 时, 存在 $\widetilde{A}_S < \widetilde{B}_S$; 当 $V_{\text{score}}(\widetilde{A}_S) = V_{\text{score}}(\widetilde{B}_S)$ 且 $T_{\text{accuracy}}(\widetilde{A}_S) < T_{\text{accuracy}}(\widetilde{B}_S)$ 时, 存在 $\widetilde{A}_S < \widetilde{B}_S$ 。

3 考虑专家风险偏好的球型模糊质量屋计算

此部分将详细介绍提出的球型模糊 TODIM 计算 QFD 的方法, 确定需求对应工程特性的优势度。该方法包括 3 个部分。

a. 需求评价与处理。

步骤 1 由专家评价供应商和顾客需求重要性, 获取球型模糊供应商和顾客需求评价矩阵 $\widetilde{S}_i^k$;

步骤 2 计算专家评价矩阵的指标相对权重 C_{kf} ;

步骤 3 计算供应商和顾客需求优势矩阵

$\varphi_k(R_g, R_h)$;

步骤 4 计算供应商和顾客需求优势度总和

$\varphi(R_g, R_h)$;

步骤 5 获取供应商和顾客需求权重 S_{iw} 。

b. 关联性评价与处理。

步骤 1 由专家评价供应商、顾客需求与工程特性的关联性, 获取球型模糊关联性评价矩阵 $\widetilde{H}_{ij}^k$;

步骤 2 基于球型加权算术平均, 计算供应商、顾客需求与工程特性关联聚合评价矩阵 $\widetilde{H}_{ij}$ 。

c. 工程特性重要度的计算。

步骤 1 计算供应商和顾客需求的相对权重 ω_{ir} ;

步骤 2 计算工程特性优势矩阵 $\varphi_i(E_j, E_p)$;

步骤 3 计算工程特性优势度总和 $\varphi(E_j, E_p)$;

步骤 4 工程特性重要度排序。

假设一个质量屋问题, 通过市场调研和供应商调研获得了 QFD 方案规划中的供应商和顾客需求, 记为 $R = \{R_i | 1 \leq i \leq m, i \in \mathbb{N}^+\}$, 再将供应商和顾客需求映射到具体的工程特性上, 记为 $E = \{E_j | 1 \leq j \leq n, j \in \mathbb{N}^+\}$ 。参与需求和工程特性之间关联性评价的专家或决策者记为 $C = \{C_k | 1 \leq k \leq l, k \in \mathbb{N}^+\}$ 。由于各位专家的专业领域、学术水平各不相同, 所以需要确定每个专家评价矩阵的指标权重, 记为 $C_{k\omega} = \{C_{k\omega} | 1 \leq k \leq l, k \in \mathbb{N}^+\}$, 且 $\sum_{k=1}^l C_{k\omega} = 1$, 可以假设每位专家评价指标权重相等或不等。由

于在实际产品设计和开发中很难准确估计需求和工程特性之间的相关性,因此,假设专家用球型模糊建模的语义进行评估。

3.1 需求评价与处理

专家根据语义评价标度 $O=\{\text{绝对重要 (AMI), 非常重要 (VHI), 比较重要 (HI), 稍微重要 (SMI), 同等重要 (EI), 稍微不重要 (SLI), 比较不重要 (LI), 非常不重要 (VLI), 绝对不重要 (ALI)}\}$, 对供应商和顾客需求重要性进行评价。基于球型加权算术平均 (SWAM), 对球型模糊需求专家评价矩阵进一步处理, 得到供应商和顾客需求聚合权重。为了方便后续计算, 利用球型模糊分数函数, 将需求聚合权重转化为自然数。

步骤1 由专家评价供应商和顾客需求重要性, 得到球型模糊供应商和顾客需求评价矩阵 $\tilde{S}_i^k$ 。

l 位专家根据语义评价标度 O , 对 m 个顾客需求的重要性进行语义评价。然后将每位专家的语义评价转化为球型模糊数, 得到球型模糊供应商和顾客需求评价矩阵 $\tilde{S}_i^k$ 。

步骤2 计算专家评价矩阵的指标相对权重。

$$C_{kf} = \frac{C_{k\omega}}{C_{f\omega}}, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (10)$$

式中, $C_{f\omega}$ 为专家指标权重的最大值。

步骤3 计算供应商和顾客需求优势矩阵。

专家 C_k 评价供应商和顾客需求 R_g 相对于供应商和顾客需求 R_h 的重要度计算如下:

$$\varphi_k(R_g, R_h) = \begin{cases} \sqrt{D(\tilde{A}_S, \tilde{B}_S) C_{kf} / \sum_{k=1}^l C_{kf}}, & \tilde{A}_S > \tilde{B}_S \\ 0, & \tilde{A}_S = \tilde{B}_S \\ -\frac{1}{\theta} \sqrt{D(\tilde{A}_S, \tilde{B}_S) \sum_{k=1}^l C_{kf} / C_{kf}}, & \tilde{A}_S < \tilde{B}_S \end{cases} \quad (11)$$

式中: θ 表示损失规避系数, $\theta > 0$; $D(\tilde{A}_S, \tilde{B}_S)$ 表示供应商和顾客需求重要性评价球型模糊数 $\tilde{A}_S$ 和 $\tilde{B}_S$ 的距离。

步骤4 计算供应商和顾客需求优势度总和。

供应商和顾客需求 R_g 相对于供应商和顾客需求 R_h 的优势度为

$$\varphi(R_g, R_h) = \sum_{j=1}^l \varphi_j(R_g, R_h), \quad g, h = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

步骤5 获取供应商和顾客需求权重 S_{iw} 。

利用优势度总和排序时, 存在相对优势度 $\xi_{\max}=1$ 和 $\xi_{\min}=0$ 。 ξ 的取值能帮助供应商和顾客需求排序, 但不方便对供应商和顾客需求赋权。因此, 设置拓展度 η , 使得供应商和顾客需求优势度总和和取值范围 d 变大, 即

$$d = \max_{1 \leq k \leq l} \left\{ \sum_{h=1}^l \varphi(R_g, R_h) \right\} - \min_{1 \leq k \leq l} \left\{ \sum_{h=1}^l \varphi(R_g, R_h) \right\} \quad (13)$$

拓展后供应商和顾客需求相对优势度最大值为

$$\xi_{\max}^* = \max_{1 \leq k \leq l} \left\{ \sum_{h=1}^l \varphi(R_g, R_h) \right\} + \eta d \quad (14)$$

拓展后供应商和顾客需求相对优势度最小值为

$$\xi_{\min}^* = \min_{1 \leq k \leq l} \left\{ \sum_{h=1}^l \varphi(R_g, R_h) \right\} - \eta d \quad (15)$$

$$\xi(R_g) = \frac{\sum_{h=1}^l \varphi(R_g, R_h) - \xi_{\min}^*}{\xi_{\max}^* - \xi_{\min}^*}, \quad g = 1, 2, \dots, l \quad (16)$$

拓展后, $\xi(R_g) \in (0, 1)$, 然后对 $\xi(R_g)$ 使用归一化方法, 获取供应商和顾客需求权重 $S_{iw} = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$ 。

3.2 关联性评价与处理

专家根据语义评价标度 O , 对供应商、顾客需求与工程特性关联性进行评价。基于球型加权算术平均, 对球型模糊供应商、顾客需求与工程特性关联性评价矩阵进行聚合处理。

步骤1 由专家评价供应商、顾客需求与工程特性的关联性, 得到球型模糊关联性评价矩阵 $\tilde{H}_{ij}^k$ 。

l 位专家依据语义评价标度 O , 对 m 个供应商、顾客需求与 n 个工程特性关联性进行比较, 得到供应商、顾客需求与工程特性关联性评价矩阵。随后将每位专家的语义评价转化为球型模糊数, 得到球型模糊供应商、顾客需求与工程特性关联性评价矩阵 $\tilde{H}_{ij}^k$ 。

步骤2 基于 SWAM 的供应商、顾客需求与工程特性关联性聚合评价矩阵 $\tilde{H}_{ij}$ 。

根据式(7), 对球型模糊供应商、顾客需求与工程特性关联性评价矩阵 $\tilde{H}_{ij}^k$ 进行聚合计算, 得到 SWAM 供应商、顾客需求与工程特性关联性评价聚合决策矩阵 $\tilde{H}_{ij}$ 。

$$\widetilde{H}_{ij} = \begin{pmatrix} (\mu_{11}, v_{11}, \pi_{11}) & (\mu_{12}, v_{12}, \pi_{12}) & \dots & (\mu_{1n}, v_{1n}, \pi_{1n}) \\ (\mu_{21}, v_{21}, \pi_{21}) & (\mu_{22}, v_{22}, \pi_{22}) & \dots & (\mu_{2n}, v_{2n}, \pi_{2n}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ (\mu_{m1}, v_{m1}, \pi_{m1}) & (\mu_{m2}, v_{m2}, \pi_{m2}) & \dots & (\mu_{mn}, v_{mn}, \pi_{mn}) \end{pmatrix}$$

3.3 工程特性重要度的计算

TODIM 是一种考虑决策者具备参考经验和规避风险的能力，处理各种多属性决策问题的排序方法。在此阶段，利用 TODIM 考虑决策者心理因素的优势，计算每个工程特性相对于其他工程特性的重要度，并且通过计算总体重要度来确定工程特性的排序，程序步骤概述如下：

步骤 1 计算供应商和顾客需求的相对权重。

参考需求权重 S_{iw} 的相对权重可通过以下公式计算：

$$\omega_{ir} = \frac{\omega_i}{\omega_r}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

式中， ω_r 为需求权重的最大值。

步骤 2 计算工程特性优势矩阵。

优势矩阵由不同顾客需求下工程特性之间优势度组成，在需求 $R_i (i=1, 2, \dots, m)$ 条件下，工程特性 E_j 相对于工程特性 E_p 的重要度计算如下：

$$\varphi_i(E_j, E_p) = \begin{cases} \sqrt{D(\widetilde{A}_H, \widetilde{B}_H) w_{ir} / \sum_{i=1}^n w_{ir}}, & \widetilde{A}_H > \widetilde{B}_H \\ 0, & \widetilde{A}_H = \widetilde{B}_H \\ -\frac{1}{\theta} \sqrt{D(\widetilde{A}_H, \widetilde{B}_H) \sum_{i=1}^n w_{ir} / w_{ir}}, & \widetilde{A}_H < \widetilde{B}_H \end{cases} \quad (18)$$

式中， $D(\widetilde{A}_H, \widetilde{B}_H)$ 表示工程特性与供应商和顾客需求关联性评价球型模糊数 $\widetilde{A}_H$ 和 $\widetilde{B}_H$ 的距离。

步骤 3 计算工程特性优势度总和。

工程特性 E_j 相对于工程特性 E_p 的优势度为

$$\varphi(E_i, E_p) = \sum_{j=1}^n \varphi_j(E_i, E_p), \quad i, p = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

步骤 4 工程特性重要度排序。

工程特性 E_i 相对于其他工程特性的整体优势度值可通过式(15)计算，即

$$\xi(E_i) = \frac{\sum_{p=1}^m \varphi(E_i, E_p) - \min_{1 \leq i \leq m} \left\{ \sum_{p=1}^m \varphi(E_i, E_p) \right\}}{\max_{1 \leq i \leq m} \left\{ \sum_{p=1}^m \varphi(E_i, E_p) \right\} - \min_{1 \leq i \leq m} \left\{ \sum_{p=1}^m \varphi(E_i, E_p) \right\}}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (20)$$

$\xi(E_i)$ 优势度值越大，代表工程特性 E_i 越重要。基于所有工程特性的整体值 $\xi(E_i)$ ，可对 m 个工程特性进行排序，并且特定产品开发的关键工程特性可由此判定。

4 案例分析

4.1 背景描述

互联网+和大数据技术的应用，促使各行业迎来企业管理数字化转型的热潮。企业管理数字化、信息化程度提高，能直接提高生产制造效率，实时监控生产质量水平，加强与供应商的合作力度，获得更高的顾客满意度，有助于贯彻价值共创理念。

企业 A 是一家知名电动汽车生产制造商，主要业务包括电动汽车的设计、生产、组装、销售，即依据设计图纸向供应商购买部件，自行加工组装，然后销售给普通用户。为了把握国家“双碳”政策红利，提升经营效益，扩大市场占有率，企业 A 计划面向供应商和顾客的需求，实施生产管理模式的数字化升级，建设产品服务系统，针对性地优化生产制造过程和产品服务内容。

通过对企业 A 顾客的市场调研和供应商座谈，最终提取供应商和顾客需求共 7 个：整车性能好(R_1)、续航里程高(R_2)、性价比高(R_3)、安全性和稳定性强(R_4)、温度耐久(R_5)、售后质量好(R_6)、信息反馈及时(R_7)。由 A 公司分别负责市场、设计、生产等领域的专家共同商讨给出与需求相关联的 10 个工程特性，分别为：零件耐久性(E_1)、发动机额定功率(E_2)、信息化平台(E_3)、成本(E_4)、功率温度系数(E_5)、产品设计(E_6)、动力电池(E_7)、材料种类(E_8)、保养维修(E_9)、效率(E_{10})。

4.2 计算步骤与结果分析

邀请 5 位专家组成专家组，其中包括 A 企业 1 名销售经理、1 名采购经理和 3 名产品设计生产领域的高级工程师。专家依据表 1 语义评价标度和对应球型模糊数，对供应商和顾客需求开展重要性评价。他们在各自领域中有丰富的实践经验和充足的理论知识，但由于他们的经验水平各不相同，所以分配权重分别为 $E_{\omega} = \{0.3, 0.2, 0.3, 0.1, 0.1\}$ 。

a. 需求评价与处理。

专家依据表 1 的语义评价标度，对 7 个供应商

表 1 语义评价标度及对应球型模糊数^[2]

Tab.1 Semantic evaluation scale and corresponding spherical fuzzy number^[2]

语义评价	(μ, v, π)
绝对重要 (AMI)	(0.9,0.1,0.1)
非常重要 (VHI)	(0.8,0.2,0.2)
比较重要 (HI)	(0.7,0.3,0.3)
稍微重要 (SMI)	(0.6,0.4,0.4)
同等重要 (EI)	(0.5,0.5,0.5)
稍微不重要 (SLI)	(0.4,0.6,0.4)
比较不重要 (LI)	(0.3,0.7,0.3)
非常不重要 (VLI)	(0.2,0.8,0.2)
绝对不重要 (ALI)	(0.1,0.9,0.1)

和顾客需求重要性进行评价,并转化为球型模糊数,得到球型模糊供应商和顾客需求评价矩阵 $\tilde{S}_i^k$,如表 2 所示。

表 2 供应商和顾客需求的重要性评价矩阵、需求结合权重及需求权重

Tab.2 Importance evaluation matrix, demand combination weight and demand weight of supplier and customer demand

需求	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
R_1	(0.6,0.4,0.4)	(0.5,0.5,0.5)	(0.8,0.2,0.2)	(0.7,0.3,0.3)	(0.8,0.2,0.2)
R_2	(0.5,0.5,0.5)	(0.7,0.3,0.3)	(0.7,0.3,0.3)	(0.2,0.8,0.2)	(0.8,0.2,0.2)
R_3	(0.7,0.3,0.3)	(0.6,0.4,0.4)	(0.2,0.8,0.2)	(0.5,0.5,0.5)	(0.6,0.4,0.4)
R_4	(0.9,0.1,0.1)	(0.6,0.4,0.4)	(0.9,0.1,0.1)	(0.8,0.2,0.2)	(0.9,0.1,0.1)
R_5	(0.7,0.3,0.3)	(0.8,0.2,0.2)	(0.4,0.6,0.4)	(0.7,0.3,0.3)	(0.9,0.1,0.1)
R_6	(0.7,0.3,0.3)	(0.7,0.3,0.3)	(0.5,0.5,0.5)	(0.6,0.4,0.4)	(0.7,0.3,0.3)
R_7	(0.5,0.5,0.5)	(0.6,0.4,0.4)	(0.2,0.8,0.2)	(0.5,0.5,0.5)	(0.4,0.6,0.4)

根据式(10)~(12)计算得到供应商和顾客需求优势度总和 $\varphi(R_g,R_h)$,如表 3 所示。其中,

$$\max_{1 \leq k \leq l} \left\{ \sum_{h=1}^l \varphi(R_g,R_h) \right\} = 3.077, \min_{1 \leq k \leq l} \left\{ \sum_{h=1}^l \varphi(R_g,R_h) \right\} = -43.335$$

令拓展度 $\eta=0.01$,得到拓展值为 0.464。根据式(13)~(15),拓展后供应商和顾客需求优势度总和的最大值为 3.541、最小值为-43.799。根据式(16)得到供应商和顾客需求相对优势度 $\xi(R_g)=(0.540, 0.355, 0.228, 0.990, 0.858, 0.538, 0.010)^T$,归一化后得到供应商和顾客需求权重 $S_{iw}=(0.153, 0.101, 0.065, 0.281, 0.244, 0.153,$

表 3 供应商和顾客需求优势度矩阵及优势度总和

Tab.3 Superiority matrix of supplier and customer demand and sum of superiority

需求	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	总和
R_1	0.000	-0.605	-1.984	-8.611	-4.741	-2.108	-0.190	-18.240
R_2	-4.954	0.000	-2.756	-7.319	-7.332	-3.272	-1.384	-27.017
R_3	-5.582	-4.896	0.000	-7.789	-7.774	-7.624	0.642	-33.024
R_4	1.542	-0.328	1.372	0.000	-0.591	-0.354	1.437	3.077
R_5	-0.515	-0.213	1.217	-4.788	0.000	-0.516	1.647	-3.168
R_6	-5.284	-2.981	1.207	-7.062	-5.825	0.000	1.627	-18.317
R_7	-7.476	-5.493	-3.715	-8.168	-9.369	-9.113	0.000	-43.335

$0.003)^T$ 。

b. 关联性评价与处理。

专家依据表 1 的语义评价标度,对 7 个供应商、顾客需求与 10 个工程特性之间的关联性进行语义评价,如表 4 所示。随后根据表 1 语义评价对应的球型模糊数,将专家评价语义评价矩阵转换为球型模糊数评价矩阵,如表 5 所示。

表 4 专家 1 对供应商、顾客需求与工程特性关联性的语义评价矩阵

Tab.4 Expert 1's semantic evaluation matrix for the relationship between supplier/customer requirements and engineering characteristics

工程特性	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
E_1	AMI	AMI	EI	ALI	LI	ALI	SLI
E_2	HI	AMI	LI	ALI	VLI	VLI	VLI
E_3	AMI	HI	EI	ALI	ALI	HI	AMI
E_4	EI	EI	LI	EI	AMI	ALI	SMI
E_5	VLI	VLI	HI	EI	SLI	EI	EI
E_6	VLI	LI	VLI	HI	AMI	VLI	ALI
E_7	ALI	ALI	ALI	SLI	ALI	AMI	AMI
E_8	EI	EI	VHI	HI	HI	VLI	VLI
E_9	ALI	HI	VLI	HI	EI	EI	SMI
E_{10}	HI	LI	SMI	VHI	EI	LI	AMI

依据式(7),对各专家供应商、顾客需求与工程特性关联性评价矩阵进行聚合,得到基于 SWAM 的供应商、顾客需求与工程特性关联性评价聚合决策矩阵 $\tilde{H}_{ij}$,如表 6 所示。

c. 工程特性重要度的计算。

TODIM 方法用于确定所考虑的工程特性的优先级排序。在顾客需求 R_i 条件下,根据距离公式

表 5 专家 1 对供应商、顾客需求与工程特性关联性的球型模糊数评价矩阵

Tab.5 Expert 1's spherical fuzzy number evaluation matrix for the relationship between supplier/customer requirements and engineering characteristics

工程特性	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
E_1	(0.9,0.1,0.1)	(0.9,0.1,0.1)	(0.5,0.5,0.5)	(0.1,0.9,0.1)	(0.3,0.7,0.3)	(0.1,0.9,0.1)	(0.4,0.6,0.4)
E_2	(0.7,0.3,0.3)	(0.9,0.1,0.1)	(0.3,0.7,0.3)	(0.1,0.9,0.1)	(0.2,0.8,0.2)	(0.2,0.8,0.2)	(0.2,0.8,0.2)
E_3	(0.9,0.1,0.1)	(0.7,0.3,0.3)	(0.5,0.5,0.5)	(0.1,0.9,0.1)	(0.1,0.9,0.1)	(0.7,0.3,0.3)	(0.9,0.1,0.1)
E_4	(0.5,0.5,0.5)	(0.5,0.5,0.5)	(0.3,0.7,0.3)	(0.5,0.5,0.5)	(0.9,0.1,0.1)	(0.1,0.9,0.1)	(0.6,0.4,0.4)
E_5	(0.2,0.8,0.2)	(0.2,0.8,0.2)	(0.7,0.3,0.3)	(0.5,0.5,0.5)	(0.4,0.6,0.4)	(0.5,0.5,0.5)	(0.5,0.5,0.5)
E_6	(0.2,0.8,0.2)	(0.3,0.7,0.3)	(0.2,0.8,0.2)	(0.7,0.3,0.3)	(0.9,0.1,0.1)	(0.2,0.8,0.2)	(0.1,0.9,0.1)
E_7	(0.1,0.9,0.1)	(0.1,0.9,0.1)	(0.1,0.9,0.1)	(0.4,0.6,0.4)	(0.1,0.9,0.1)	(0.9,0.1,0.1)	(0.9,0.1,0.1)
E_8	(0.5,0.5,0.5)	(0.5,0.5,0.5)	(0.8,0.2,0.2)	(0.7,0.3,0.3)	(0.7,0.3,0.3)	(0.2,0.8,0.2)	(0.2,0.8,0.2)
E_9	(0.1,0.9,0.1)	(0.7,0.3,0.3)	(0.2,0.8,0.2)	(0.7,0.3,0.3)	(0.5,0.5,0.5)	(0.5,0.5,0.5)	(0.6,0.4,0.4)
E_{10}	(0.7,0.3,0.3)	(0.3,0.7,0.3)	(0.6,0.4,0.4)	(0.8,0.2,0.2)	(0.5,0.5,0.5)	(0.3,0.7,0.3)	(0.9,0.1,0.1)

表 6 基于 SWAM 供应商、顾客需求与工程特性关联性评价聚合决策矩阵

Tab.6 Aggregate decision matrix of relevance evaluation between supplier/customer requirements and engineering characteristics based on SWAM

工程特性	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
E_1	(0.88,0.12,0.13)	(0.88,0.12,0.13)	(0.50,0.50,0.50)	(0.18,0.83,0.18)	(0.50,0.55,0.25)	(0.13,0.88,0.13)	(0.49,0.52,0.47)
E_2	(0.70,0.31,0.31)	(0.89,0.11,0.12)	(0.33,0.67,0.34)	(0.14,0.87,0.14)	(0.14,0.87,0.14)	(0.16,0.85,0.16)	(0.18,0.82,0.19)
E_3	(0.87,0.13,0.14)	(0.85,0.15,0.16)	(0.47,0.54,0.48)	(0.20,0.82,0.20)	(0.51,0.56,0.27)	(0.77,0.23,0.24)	(0.86,0.14,0.15)
E_4	(0.50,0.50,0.50)	(0.50,0.50,0.50)	(0.24,0.77,0.24)	(0.52,0.48,0.47)	(0.81,0.19,0.23)	(0.14,0.87,0.14)	(0.56,0.44,0.45)
E_5	(0.26,0.75,0.26)	(0.23,0.78,0.23)	(0.78,0.23,0.24)	(0.53,0.47,0.47)	(0.29,0.73,0.29)	(0.45,0.55,0.46)	(0.45,0.55,0.46)
E_6	(0.24,0.77,0.24)	(0.27,0.73,0.28)	(0.27,0.75,0.27)	(0.80,0.20,0.21)	(0.82,0.18,0.19)	(0.24,0.77,0.24)	(0.14,0.87,0.14)
E_7	(0.15,0.86,0.15)	(0.11,0.89,0.11)	(0.14,0.87,0.14)	(0.37,0.63,0.38)	(0.10,0.90,0.10)	(0.88,0.12,0.13)	(0.89,0.11,0.11)
E_8	(0.52,0.48,0.48)	(0.44,0.57,0.45)	(0.77,0.24,0.24)	(0.73,0.27,0.28)	(0.76,0.24,0.25)	(0.21,0.79,0.21)	(0.22,0.78,0.23)
E_9	(0.13,0.88,0.13)	(0.66,0.34,0.34)	(0.25,0.76,0.25)	(0.70,0.30,0.31)	(0.52,0.48,0.48)	(0.55,0.45,0.45)	(0.65,0.35,0.35)
E_{10}	(0.67,0.33,0.33)	(0.28,0.72,0.28)	(0.66,0.34,0.34)	(0.78,0.22,0.24)	(0.48,0.52,0.49)	(0.34,0.66,0.35)	(0.85,0.15,0.16)

式(6)、式(17)~(18)以及供应商和顾客需求权重 S_{iw} , 计算工程特性 E_j 相对工程特性 E_p 的重要度 $\varphi_i(E_j, E_p)$, 供应商、顾客需求 R_1 条件下的结果如表 7 所示。

根据式(19)计算得到 $\varphi(E_j, E_p)$ 的结果, 最后根据式(20)计算得到 10 个工程特性的价值优势结果 $\xi(E_i)$ 如表 8 所示。

根据 SWAM 工程特性的价值优势, 10 个工程特性的排序结果为: $E_3>E_{10}>E_7>E_9>E_1>E_4>E_5>E_8>E_2>E_6$ 。

排在前三位的工程特性分别为信息化平台(E_3)、效率(E_{10})、动力电池(E_7)。在产品服务系

统中, 连接生产制造企业上游供应商和下游顾客的信息平台, 能够有效降低沟通成本, 提高沟通效率, 快速响应突发事件。效率体现在沟通、设计、生产、运输等多个方面, 提高企业整体工作效率, 能够帮助企业快速适应市场, 尽量消除效率低下造成的浪费。电动汽车的核心竞争力在于电池的续航能力和充电速度, 因此不断在技术上改进电池性能, 提高电池蓄电量, 使得电动汽车具备高续航能力, 高充电效率的优势特征, 是电动汽车生产制造企业的重中之重。

4.3 灵敏度分析

TODIM 方法中的损失规避系数 θ 反映了决策

表 7 R_1 条件下 SWAM 工程特性优势度矩阵

Tab.7 Engineering characteristic dominance matrix under $R1$ condition based on SWAM

工程特性	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}
E_1	0.000	0.282	0.251	0.308	0.344	0.347	0.358	0.305	0.361	0.285
E_2	-1.836	0.000	-1.834	0.289	0.322	0.325	0.335	0.289	0.337	0.286
E_3	-1.636	0.281	0.000	0.307	0.344	0.346	0.357	0.304	0.360	0.285
E_4	-2.008	-1.885	-2.002	0.000	0.295	0.297	0.305	-1.748	0.308	-1.870
E_5	-2.244	-2.101	-2.240	-1.920	0.000	0.280	0.274	-1.941	0.273	-2.082
E_6	-2.262	-2.117	-2.257	-1.934	-1.823	0.000	0.271	-1.956	0.270	-2.098
E_7	-2.334	-2.181	-2.329	-1.990	-1.786	-1.767	0.000	-2.013	0.253	-2.161
E_8	-1.989	-1.880	-1.984	0.268	0.298	0.300	0.309	0.000	0.311	-1.867
E_9	-2.352	-2.197	-2.347	-2.004	-1.779	-1.757	-1.649	-2.028	0.000	-2.178
E_{10}	-1.858	-1.862	-1.856	0.287	0.320	0.322	0.332	0.287	0.334	0.000

表 8 基于 SWAM 工程特性优势度及排序结果

Tab.8 Dominance and ranking results of engineering characteristics based on SWAM

工程特性	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	ζ	排序
E_1	0.000	-2.421	-17.496	-17.291	-5.393	-4.156	-17.628	-7.310	-18.311	-22.220	0.519	5
E_2	-21.641	0.000	-26.560	-17.342	-21.877	-4.450	-19.799	-21.074	-20.232	-24.580	0.078	9
E_3	-7.142	-0.446	0.000	-1.904	-3.151	-2.042	-14.011	-5.252	-1.961	-5.106	1.000	1
E_4	-6.368	-8.002	-23.313	0.000	-5.634	-6.795	-15.382	-7.633	-21.608	-22.189	0.487	6
E_5	-18.930	-3.591	-23.075	-18.567	0.000	-4.572	-15.955	-6.846	-20.875	-21.890	0.370	7
E_6	-21.565	-19.213	-26.505	-18.343	-20.538	0.000	-18.190	-19.576	-19.284	-25.880	0.000	10
E_7	-9.113	-8.447	-9.119	-9.992	-9.849	-9.710	0.000	-10.785	-7.929	-10.468	0.700	3
E_8	-17.643	-3.038	-22.455	-17.272	-17.614	-3.792	-17.600	0.000	-18.596	-20.980	0.338	8
E_9	-6.452	-6.164	-22.568	-2.375	-3.788	-6.860	-16.292	-7.662	0.000	-19.748	0.656	4
E_{10}	-3.256	-3.224	-18.119	-2.680	-3.370	-1.797	-12.833	-5.731	-4.877	0.000	0.900	2

者的心理行为, θ 取值的变化也会对工程特性的排序产生影响。当 $\theta>1$ 时, 决策者的损失影响较小; 当 $0<\theta<1$ 时, 决策者的损失影响增大。损失规避系数越大, 决策者的损失规避就越明显^[22]。因此, 现对参数 θ 在球型模糊 TODIM 方法下进行灵敏度分析, 研究当 $\theta=0.2, \theta=0.6, \theta=0.8, \theta=1, \theta=1.5, \theta=0.25, \theta=2.5$ 时, 10 个工程特性的排序结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出, 在球型模糊 TODIM 方法中, 损失规避系数 θ 取值对工程特性的优先级具有重要影响。首先, 有些工程特性对损失规避系数变化不敏感, 排序结果变化不大。比如, 无论损失规避系数如何变化, 信息化平台(E_3)、效率(E_{10})、功率温度系数(E_5)排序始终保持稳定。这说明决策者对于这 3 个工程特性的关注度受风险

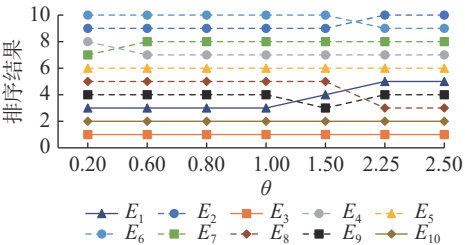


图 2 灵敏度分析排序结果

Fig. 2 Sensitivity analysis sorting results

影响较小。其次, 有些工程特性受应对风险心理偏好影响, 排序结果变化明显。随着损失规避系数增大, 材料种类(E_8)的排序提升两位。在损失规避系数从 1 增加至 2.25, 即决策者对损失敏感度降低时, 零件耐久性(E_1)排序降低三位。因此, 在使用球型模糊 TODIM 方法时, 明确决策者

对损失的敏感度,对分析 QFD 工程特性重要度具有重要意义。然而,无论损失规避系数取值如何变化,信息化平台(E_3)、效率(E_{10})在实验中一直居于重要性排序第一位和第二位。由此可见,信息化平台、效率是建设产品服务系统中的关键因素。

4.4 方法对比

为对比本文方法的有效性,基于企业 A 的案例,采用球型模糊 TOPSIS(technique for order preference by similarity to an ideal solution, 逼近于理想值的排序方法)方法对工程特性重要性进行分析。将球型模糊 QFD-TODIM 方法与球型模糊 QFD-TOPSIS 方法排序结果进行对比,通过分析两者结果相似性、差异性和可能造成差异的原因 3 个方面,来证明所提方法在工程特性重要度排序方面的有效性。

TOPSIS 方法先确定不同需求下工程特性的一个最优解和一个最劣解,再根据工程特性与最优解和最劣解的距离,得到正理想解和负理想解两种情况下的距离。最终得到每个方案的相对贴近度,根据相对贴近度对方案进行排序。相对贴近度越大,方案越优。

两种方法的排序结果对比,如图 3 所示。

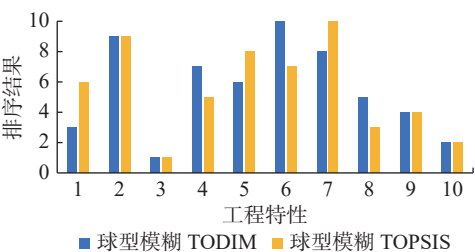


图 3 排序结果对比
Fig.3 Comparison of sorting results

球型模糊 TOPSIS 排序结果为: $E_3>E_{10}>E_8>E_9>E_4>E_1>E_6>E_5>E_2>E_7$ 。根据图 3 对比可以得到, SFS-TODIM 和 SFS-TOPSIS 方法排序结果相同的工程特性分别为: 信息化平台(E_3)、效率(E_{10})、保养维修(E_9)、发动机额定功率(E_2)。它们的排序结果分别为第一、第二、第四、第九。这证明了两种方法具有一定的有效性和科学性,同时也说明这 4 个工程特性排序不易受专家风险规避心理影响。成本(E_4)在考虑专家风险心理偏好后排序结果为第五,上升了两位次。说明在充分保证决策评价信息完整的前提下,不同方法在考虑不同影响因素后,结果发生了一定的变化,

使得评价结果更为客观真实。通过归纳总结得到造成部分排序结果差异的可能原因如下:

a. SFS-TODIM 方法主要针对评价指标对评估对象进行两两比较,即第一次将供应商和顾客需求进行两两比较,第二次将工程特性进行两两比较。两两比较的过程使最终的排序结果包含了更多评价信息,也考虑了需求之间和工程特性之间的相关性。同时,该方法也考虑到两次专家评价时规避风险的心理因素,更符合实际决策情景。也可通过调整损失规避系数 θ ,得到不同应对风险心理下的排序结果。

b. SFS-TOPSIS 方法在进行决策时,能较好地避免数据的主观性,计算思路较清晰、简易,便于实际应用,能够刻画多指标综合评价。使用该方法时,假设决策者的状态是完全理性的,并没有充分考虑决策者在决策时规避风险的心理行为。

对比实验表明,本文提出的球型模糊 TODIM 方法是可行有效的,更加符合实际决策的需要。

5 结 论

QFD 能够有效地将客户需求转化为产品的工程特性,是方案设计的重要工具之一。针对传统 QFD 计算方法不能描述模糊性、不确定性信息和工程特性加权平均算法未考虑专家风险心理的问题,本文提出一种基于球型模糊,考虑专家心理偏好的工程特性重要度分析方法。所提方法的特点有:

a. 球型模糊可在球面区间范围内独立确定隶属度、非隶属度和犹豫度,使得三个参数的平方和属于,决策者确定参数时更灵活。其中犹豫度可以用来描述专家决策评价时的犹豫状态。因此,采用球型模糊处理专家评价信息,能够解决评价信息的模糊性和不确定性问题。

b. 针对球型模糊 QFD 计算问题,采用考虑决策者心理偏好的 TODIM 方法计算工程特性重要度。首先依据专家对供应商和顾客需求的决策评价,通过 TODIM 获取供应商和顾客需求权重,然后再次采用 TODIM 计算工程特性相对优势度,进而得到工程特性重要性排序结果。

最后通过对企业 A 电动汽车制造产品服务系统工程特性重要度分析,验证了该方法的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] 朱倩, 陆秋君. 基于对称模糊数和最优 h 值线性回归模型的质量功能展开研究 [J]. 上海理工大学学报, 2016, 38(4): 318–328.
- [2] KUTLU GÜNDOĞDU F, KAHRAMAN C. Spherical fuzzy sets and spherical fuzzy TOPSIS method[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 36(1): 337–352.
- [3] 鞠萍华, 陈资, 冉琰, 等. 概率语言环境下考虑专家心理行为的 QFD 方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(7): 193–200.
- [4] 高建伟, 郭奉佳. 基于改进前景理论的直觉模糊随机多准则决策方法 [J]. 控制与决策, 2019, 34(2): 317–324.
- [5] YAGER R R, ABBASOV A M. Pythagorean membership grades, complex numbers, and decision making[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2013, 28(5): 436–452.
- [6] 陈阳, 王涛. 基于二分搜索改进 Karnik-Mendel 算法的区间二型模糊逻辑系统 [J]. 模糊系统与数学, 2020, 34(4): 73–81.
- [7] HAKTANIR E, KAHRAMAN C. A novel interval-valued Pythagorean fuzzy QFD method and its application to solar photovoltaic technology development[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 132: 361–372.
- [8] 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.
- [9] LIU H C, SHI H, LI Z W, et al. An integrated behavior decision-making approach for large group quality function deployment[J]. Information Sciences, 2022, 582: 334–348.
- [10] LIAO H C, QIN R, GAO C Y, et al. Score-HeDLiSF: a score function of hesitant fuzzy linguistic term set based on hesitant degrees and linguistic scale functions: an application to unbalanced hesitant fuzzy linguistic MULTIMOORA[J]. Information Fusion, 2019, 48: 39–54.
- [11] FARROKHIZADEH E, SEYFI-SHISHAVAN S A, KUTLU GÜNDOĞDU F, et al. A spherical fuzzy methodology integrating maximizing deviation and TOPSIS methods[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2021, 101: 104212.
- [12] KUTLU GÜNDOĞDU F, KAHRAMAN C. A novel spherical fuzzy QFD method and its application to the linear delta robot technology development[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 87: 103348.
- [13] YU Z, KHAN S A R, MATHEW M, et al. Identifying and analyzing the barriers of internet-of-things in sustainable supply chain through newly proposed spherical fuzzy geometric mean[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 169: 108227.
- [14] 杨强, 李延来. 基于直觉模糊集的质量屋顾客需求优先度及灵敏度分析 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(4): 978–986.
- [15] 耿秀丽, 徐士东, 叶春明. 顾客需求驱动的产品服务系统模块选配方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(1): 55–61.
- [16] 胡东方, 郑亚飞, 雷若楠. 基于 QFD 和 AIS 的复杂产品定制设计 [J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(9): 2053–2062.
- [17] 宫华萍, 尤建新, 王岑岚. 基于改进质量功能展开的质量特性重要度确定 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(9): 1359–1368.
- [18] GOMES L F A M, LIMA M M P P. TODIM: basics and application to multicriteria ranking of projects with environmental impacts[J]. Foundations of Computing and Decision Sciences, 1991, 16(3/4): 113–127.
- [19] RAJ SINGH R, MAITY S R, ZINDANI D. Using the TODIM method as a multi-criteria decision-making support methodology for an automobile parts manufacturing company[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 62: 1294–1298.
- [20] 孙延浩, 许伟, 张涛, 等. 考虑决策者心理行为的软件质量评价方法 [J]. 计算机应用, 2022, 42(8): 2528–2533.
- [21] WU Q, LIU X W, QIN J D, et al. An integrated generalized TODIM model for portfolio selection based on financial performance of firms[J]. Knowledge-Based Systems, 2022, 249: 108794.
- [22] 赵敬华, 张艳, 林杰. 基于概率语言和改进 TODIM 的产品服务匹配方法研究 [J]. 控制与决策, 2023, 38(4): 1119–1128.

(编辑: 丁红艺)