

基于改进质量功能展开的质量特性重要度确定

宫华萍^{1,2}, 尤建新¹, 王岑岚³

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092; 2. 同济大学 外国语学院, 上海 200092; 3. 上海大学 管理学院, 上海 200444)

摘要: 针对传统质量功能展开(QFD)质量屋构建过程存在语言评价信息模糊和不确定等问题, 提出一种结合犹豫二元语义变量、层次分析法和逼近理想解排序多属性决策法的改进 QFD 模型, 用以对产品质量特性的重要度级别进行确定。模型分为评价用户需求与质量特性的关系、确定用户需求的重要度权重、确定质量特性的重要度排序 3 个阶段, 提高了质量特性重要度排序的准确性。最后以某企业一语言类数字学习系统的质量特性重要度确定为例, 进行了模型应用和有效性验证, 为以用户为中心的数字化学习系统设计质量提升提供参考。

关键词: 质量功能展开(QFD); 质量特性; 犹豫模糊二元语义; 多属性决策

中图分类号: C93; G431

文献标志码: A

is determined. Lastly, the importance ranking of quality characteristics (Q_s) is determined. Through the above steps, the accuracy of importance ranking of quality characteristics is improved. Finally, an example of importance ranking of quality characteristics of the digital language learning system from one enterprise was given to demonstrate the effectiveness of the proposed approach. This research may provide a reference for improving the design quality of E-learning system that user-centered.

Key words: quality function deployment (QFD); quality characteristics; hesitant fuzzy 2-tuple linguistic; multiple criteria decision making

Determination of Quality Characteristics Importance Based on Improved Quality Function Deployment Model

GONG Huaping^{1,2}, YOU Jianxin¹, WANG Cenlan³

(1. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Foreign Language, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Aiming at the fuzzy and uncertain information of language evaluation in traditional quality function deployment (QFD) on the construction process of quality house, an improved QFD model combining hesitant fuzzy 2-tuple linguistic variables, multiple criteria decision making methods such as AHP and TOPSIS is proposed, to determine the importance ranking of quality characteristics. The proposed model consists of three stages. Firstly, the relationship between user needs and quality characteristics is evaluated. Secondly, the relative importance weight of user needs (C_s)

随着互联网教育市场的深入发展, 数字学习(E-learning)系统的质量问题逐渐引起企业和用户的共同关注。E-learning 系统是提供学习服务的软件产品, 其用户需求多样、质量特性类别广泛。由于企业资源有限, 不可能对所有质量特性都给予同样的重视程度, 需要根据用户需求情况合理确定质量特性的重要度排序, 并以此作为产品质量设计的依据。因此, 如何根据用户需求确定产品质量特性的重要度排序, 是产品设计所必须解决的关键问题。质量功能展开(quality function deployment, QFD)作为一种用户需求驱动的产品设计质量管理常用的理论和方法^[1], 能够将用户需求及重要度转化并映射到产品质量特性及重要度上, 有效地帮助企业解决 E-learning 系统质量方案设计的问题。

QFD 的核心技术是质量屋(house of quality, HOQ)^[2]的构建。HOQ 的构造主要包括确定用户需求项(C_s)及重要性权重、用户需求与质量特性项(Q_s)之间的关系矩阵、质量特性间相互关系矩阵和

收稿日期: 2018-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(71671125); 同济大学中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 宫华萍(1981—), 女, 管理学博士, 高级工程师, 主要研究方向为管理理论与工业工程、外语教育技术、在线学习创新。E-mail: gh_apple@163.com

通信作者: 王岑岚(1984—), 女, 博士生, 主要研究方向为管理理论与工业工程、在线服务创新。E-mail: 934010891@qq.com



扫码
查看
作者
扩展
介绍

开放科学(资源服务)
标识码(OSID)

质量特性的重要性级别排序 3 个主要步骤. HOQ 构建过程是质量特性的分解与映射转化过程,是产品设计质量控制的关键,质量屋中各部分信息的准确性与完备性是决定最终映射结果正确与否的关键.用户需求质量特性的重要度确定是 HOQ 的关键输出,是产品后续设计和资源分配的重要依据.质量特性重要度确定的前提包括用户需求的相对重要度确定、质量特性的相互影响关系、用户需求与质量特性之间的相互影响关系.

在 QFD 实际操作过程中,由于产品需求和质量特性之间存在各种相互制约和依赖关系,使得 HOQ 各部分存在信息模糊和数据冗余等问题,常常导致最终质量特性重要度确定结果不准确.最常见的模糊信息来源于 QFD 团队成员可能使用一种或多种模糊或犹豫的语言术语来表达他们对问题的判断.在处理不确定和不准确信息问题中,Torra 提出犹豫模糊集(HFSs)理论,并得到快速应用和发展.作为 HFSs 的一种扩展形式,Rodriguez 等^[3]提出了犹豫模糊语言术语集(hesitant fuzzy linguistic term sets, HFLTSs),来处理决策者在几个可能的语言值之间的犹豫不决,或者考虑在评估指标、替代变量等方面比单一语言术语更丰富表达的情况.与传统的采用单个语言术语来表述语言变量的模糊语言法相比,犹豫模糊语言术语集 HFLTSs 使得专家能够采用更加丰富灵活的语言来表达他们的评估和想法,增强决策信息表达的可行性、灵活性和可信度,并成功地应用于多种不确定信息环境下的多属性决策问题中^[4-5].为了在决策计算过程中不丢失语言信息,Herrera 和 Martinez^[6]提出了模糊犹豫二元语义计算模型.犹豫模糊二元语义集结合了二元语义和犹豫模糊语言集两者的优点,在实际应用中处理决策者的犹豫和不确定性更方便和灵活.有较多文献对犹豫模糊二元语义环境下的决策模型和方法^[7-8]进行了研究,如 Liu^[9]和 You 等^[10]提出了结合模糊二元语义和拓展 QUALIFLEX 的 QFD 模型,Wang 等^[11]提出了结合犹豫模糊理论的 QFD 拓展模型,Wu^[12]使用云 MULTIMOORA 方法对 QFD 进行改进.本文将犹豫二元语义变量引入到 QFD 的质量特性重要度级别排序中,改进了 QFD 语言评价信息模糊性和不确定性的问题.

质量屋构建过程通常由来自市场、设计和监管等多个跨职能部门成员和顾客组成的专家团队,共同确定产品用户需求的重要度权重、评价用户需求与质量特性之间的相互作用关系及质量特性内部之

间的关系等,因此 QFD 是一个群体决策行为过程. MCDM(multiple criteria decision making, MCDM)是指在具有相互冲突、不可共度的有限(无限)方案集中进行选择的决策,是解决群决策问题的有用工具^[13]. MCDM 理论和方法很多,包括层次分析法(analytical hierarchy process, AHP)和逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)等,在工程、技术、经济、管理和军事等诸多领域中都有广泛的应用. AHP 是一种层次权重决策分析方法,是指将与总决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法,由美国运筹学家 Satty 于 20 世纪 70 年代初提出. AHP 方法简洁实用,所需定量数据少,能够模拟决策过程的思维方式,有效分解和简化复杂系统内部的各种相互关系等优势.但由于其在指标过多、统计数据量大时的特征向量求法比较复杂等问题,在使用中存在一定的局限和待改进之处. TOPSIS 是 MCDM 中一种常用的快捷有效的方法,能够全面、合理、准确地对多种方案进行优劣排序,由 Hwang 和 Yoon^[14]于 1981 年提出. TOPSIS 方法相对于传统的用于评价问题的多元统计方法来说,具有分析原理直观、计算简便,对样本要求量不大等特点,自提出后得到广泛应用和研究.目前 TOPSIS 拓展研究主要分为 2 个方向,一是将 TOPSIS 与模糊集结合,用以处理模糊多目标决策问题,如 Li^[15]提出了基于 TOPSIS 与区间直觉模糊集的非线性规划方法;Liang 等^[16]提出了犹豫勾股模糊集扩展的 TOPSIS 方法;Mousavi-Nasab 等^[17]提出 COPRAS 和 DEA 相结合的 TOPSIS 方法;Yusuf^[18]提出了基于模糊 AHP 和 TOPSIS 法结合的多目标决策评价模型等.二是将 TOPSIS 与偏好结合,充分考虑决策者的偏好态度.由于多目标决策问题大多受到决策者的态度影响,通过加权是考虑偏好因素的一种解决方案,如 Yager^[19]提出的有序加权评价(OWA)算子是目前常用的加权方法,它能够针对不同的情景灵活调整相关权重,得到对应的集成结果. Merigo^[20]提出的改进 OWD 算子,是 OWA 算子与距离的有效结合,尝试通过不同的距离如明海距离、欧式距离、集合距离等,分析比较集成结果的差异. Xu 等^[21]提出犹豫模糊语言 LOWD 算子用于解决语言评价集成问题,并对其算子属性和具体决策流程进行了阐述. Liu 等^[22]提出了将 ITWA 算子用于犹豫模糊等语言信息环境下的 TOPSIS 问题.将犹豫模糊二元语义与

MCDM 方面结合已经成为目前 QFD 中处理多目标决策问题的重要改进方向。

本文结合模糊犹豫二元语义和 MCDM 方法对传统 QFD 进行改进,通过构建结合犹豫二元语义变量、AHP 和 TOPSIS 的改进 QFD 模型,对质量特性重要性排序进行决策。最后以某教育软件企业的一款语言类 E-learning 系统的设计质量特性重要性排序为例,验证所提模型的可用性和有效性,为 E-learning 系统质量方案设计和设计质量提升提供信息参考。

1 相关知识准备

为了便于研究,下面给出犹豫模糊语言术语集和区间二元语义等的有关概念。

1.1 犹豫模糊语言术语集

定义 1 设 $S = \{s_i | i=0, 1, 2, \dots, g\}$ 是给定的一个语言术语集 HFLTS, H_S 指的是 S 上有限个连续的语言术语的有序子集,表示为 $H_S = \{s_i, s_{i+1}, \dots, s_j\}$ 。其中,空的和完整的 HFLTSs 语言变量 θ 分别被定义为 $H_S(\theta) = \phi$ 和 $H_S(\theta) = S$ 。

定义 2 设语言术语集 S 的上下文无关语法是一个 4 元组 $G_H = (V_N, V_T, I, P)$, 其中, V_N 表示一组非终结符号, V_T 表示一组终结符号, I 是开始符号, P 表示生产规则。 G_H 的元素定义如下:

$$V_N = \{\langle B_t \rangle, \langle M_t \rangle, \langle U_r \rangle, \langle H_r \rangle, \langle O_j \rangle\}$$

式中: B_t 表示基本术语; M_t 表示复合术语; U_r 表示一元关系; H_r 表示二元关系; O_j 表示连词。

$$V_T = \{<, >, \geq, \leq, \sim, s_0, s_1, \dots, s_g\}$$

式中运算符分别代表语言信息:“低于、在...之下”、“高于、在...之上”、“最少、最低”、“最多、最高”、“在(介于)...之间、和”以及语言评价子集 s_0, s_1, \dots, s_g 。

$$I \in V_N;$$

$$P = \{I ::= \langle B_t \rangle | \langle M_t \rangle$$

$$\langle M_t \rangle ::= \langle U_r \rangle \langle B_t \rangle | \langle H_r \rangle \langle B_t \rangle | \langle O_j \rangle \langle B_t \rangle$$

$$\langle B_t \rangle ::= s_0, s_1, \dots, s_g$$

$$\langle U_r \rangle ::= < | > | \geq | \leq$$

$$\langle H_r \rangle ::= \sim$$

$$\langle O_j \rangle ::= =$$

式中“ $::=$ ”为正则表达式,是“相当于”的意思。类似“ $\langle B_t \rangle$ ”中的“ \langle ”符号,是定义语句用的占位符。

定义 3 通过上下文无关语法,可以将简单而丰富的语言表达通过转换函数转换为 HFLTSs。设

E_{GH} 表示将语言表达转换成 HFLTSs 的转换函数, G_H 表示上下文无关方法, S 是语言术语集。将由 G_H 生成的语言表达转换为 HFLTSs 的转换规则表达如下:

$$E_{GH}(s_k) = \{s_k | s_k \in S\};$$

$$E_{GH}(> s_i) = \{s_k | s_k \in S, s_k > s_i\};$$

$$E_{GH}(< s_i) = \{s_k | s_k \in S, s_k < s_i\};$$

$$E_{GH}(\geq s_i) = \{s_k | s_k \in S, s_k \geq s_i\};$$

$$E_{GH}(\leq s_i) = \{s_k | s_k \in S, s_k \leq s_i\};$$

$$E_{GH}(s_i \sim s_j) = \{s_k | s_k \in S, s_i \leq s_k \leq s_j\}.$$

例如, $S = \{\text{极差, 很差, 差, 一般, 好, 很好, 极好}\}$ 作为对一本书的语言术语集, 则 $S = \{s_i | i=0, 1, 2, \dots, 6\}$ 。假设一位专家对 3 本书的 3 个属性给出的原始语言评价结果分别为:极好、介于很坏和坏之间、一般;最多为差、在好之上、好;最少为好、介于好和很好之间、坏。则通过 E_{GH} 转换为对应的 HFLTSs 的形式之后的专家评价可表示为: $\{s_6\}, \{s_1, s_2\}, \{s_3\}; \{s_0, s_1, s_2\}, \{s_5, s_6\}, \{s_4\}; \{s_4, s_5, s_6\}, \{s_4, s_5\}, \{s_2\}$ 。

定义 4 设 $S = \{s_0, s_1, \dots, s_g\}$ 是语言术语集, 设 $e_m(H_S)$ 表示 HFLTSs 的语言包络区间, 其区间的极限由其上界 H_S^+ 和下界 H_S^- 的方法如下所示:

$$e_m(H_S) = [H_S^+, H_S^-], \quad H_S^- \leq H_S^+ \quad (1)$$

$$H_S^+ = \max(s_i) = s_j, s_i \leq s_j, \text{ 且 } s_i \in H_S, \forall i \quad (2)$$

$$H_S^- = \min(s_i) = s_j, s_i \geq s_j, \text{ 且 } s_i \in H_S, \forall i \quad (3)$$

1.2 区间二元语义

定义 5 设 $\bar{a}_i = [(r_i, \alpha_i), (t_i, \epsilon_i)] (i=1, 2, \dots, n)$ 是一个二元组集合, $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T$ 是一个关联的加权向量, 且 $\omega_j \in [0, 1], \sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 。区间二元有序加权评价(interval 2-tuple ordered weighted averaging, I_{TOWA})算子定义如下:

$$I_{TOWA_\varphi}(\bar{a}_1, \bar{a}_2, \dots, \bar{a}_n) =$$

$$\Delta \left[\sum_{j=1}^n \omega_j \Delta^{-1}(\gamma_{\sigma(j)}, \alpha_{\sigma(j)}), \sum_{j=1}^n \omega_j \Delta^{-1}(\gamma_{\sigma(j)}, \alpha_{\sigma(j)}) \right]$$

$$(4)$$

式中: $(\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(n))$ 是一组 $(1, 2, \dots, n)$ 的数列, 对于所有的 $j=2, \dots, n$ 来说, $\bar{a}_{\sigma(j-1)} \geq \bar{a}_{\sigma(j)}$; Δ 表示区间二元关系的距离大小, 用“ $[\]$ ”内的 2 个数值表示。

定义 6 设 $\bar{a}_1 = [(\gamma_1, \alpha_1), (t_1, \epsilon_1)]$ 且 $\bar{a}_2 = [(\gamma_2, \alpha_2), (t_2, \epsilon_2)]$ 是由语言术语集 S 定义的 2 个任意的二元组, $S = \{s_0, s_1, \dots, s_g\}$, 然后 \bar{a}_1 与 \bar{a}_2 之间的包含关系比较定义如下:

$$p(\bar{a}_1 \supseteq \bar{a}_2) = \max \left\{ 1 - \max \left(\frac{\delta_2 - \beta_1}{h(\bar{a}_1) - h(\bar{a}_2)}, 0 \right), 0 \right\} \quad (5)$$

式中: $h(\bar{a}_1) = \Delta^{-1}(t_1, \epsilon_1) - \Delta^{-1}(t_1, \alpha_1) = \delta_1 - \beta_1$, $h(\bar{a}_2) = \Delta^{-1}(t_2, \epsilon_2) - \Delta^{-1}(t_2, \alpha_2) = \delta_2 - \beta_2$ 且 $p(\bar{a}_1 \supseteq \bar{a}_2)$ 是 \bar{a}_1 大于等于 \bar{a}_2 的级别. $p(\bar{a}_1 \supseteq \bar{a}_2)$ 可能的包含比较关系满足以下属性:

如果 $0 \leq p(\bar{a}_1 \supseteq \bar{a}_2) \leq 1$, 则 $p(\bar{a}_1 \supseteq \bar{a}_2) = 0$.

如果 $(t_1, \epsilon_1) \leq (\gamma_2, \alpha_2)$, 则 $p(\bar{a}_1 \supseteq \bar{a}_2) = 1$.

如果 $(t_1, \epsilon_1) \geq (\gamma_2, \alpha_2)$, 则 $p(\bar{a}_1 \supseteq \bar{a}_2) + p(\bar{a}_2 \supseteq \bar{a}_1) = 1$.

如果 $p(\bar{a}_1 \supseteq \bar{a}_2) = p(\bar{a}_2 \supseteq \bar{a}_1)$, 则 $p(\bar{a}_1 \supseteq \bar{a}_2) = p(\bar{a}_2 \supseteq \bar{a}_1) = 0.5$.

由于可能包含的比较关系包括有用性和重要性, 可以通过成对包含比较的可能性来获得区间二元组值之间的比较. 对于一组区间二元组 $\bar{a}_i = [(\gamma_i, \alpha_i), (t_i, \epsilon_i)] (i=1, 2, \dots, n)$, 首先使用 E_q 计算成对区间二元组的包含比较可能性, 设 $p_{ij} = p(\bar{a}_i \supseteq \bar{a}_j) (i, j=1, 2, \dots, n)$, 可以构造包含比较矩阵 $P = [p_{ij}]_{m \times n}$. 然后确定区间二元组的最佳隶属度如下:

$$\bar{p}(\bar{a}_i) = \frac{1}{n(n-1)} \left(\sum_{j=1}^n p_{ij} + \frac{n}{2} - 1 \right) \quad (6)$$

因此所有区间二元组的排序可以根据 $\bar{p}(\bar{a}_i)$ 值的降序来产生.

2 改进质量功能展开模型构建

在 QFD 具体实践中, 由于时间压力、知识背景或 QFD 实际操作经验局限等, 用户需求权重并不完全已知; 另一方面, QFD 专家难以用准确数值对用户需求和质量特性关系进行评价, 常使用模糊不确定的语言信息. 传统质量屋模型由于数据冗余和质量屋体型庞大等问题存在较多缺陷, 特别是质量特性排序方面, 忽略了实际存在的质量屋构建内部和相互之间的约束和交互关系. 为了更加全面和真实地获取 QFD 过程中专家语言评价信息, 提高信息表达的准确性和决策结果的科学性, 提出了一种结合犹豫模糊二元语义变量、AHP 和 TOPSIS 方法的改进 QFD 模型(见图 1). 改进 QFD 模型由 3 个阶段组成: ①评价用户需求和质量特性之间的关系; ②确定用户需求的重要度权重; ③确定质量特性的重要度排序. 首先在犹豫二元语义环境中, 通过将 HFLTSSs 和区间二元组集成到 QFD 中, 以解决用户需求和质量特性之间的关系. 然后基于 AHP 方法建立用户需求的优化模型, 以确定用户需求的重要度权重. 最后通过 TOPSIS 方法来确定每个质量特性的重要度排序.

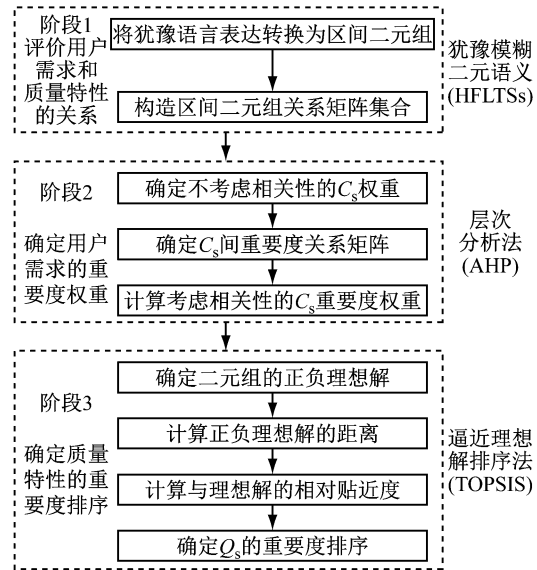


图 1 改进质量功能展开模型流程

Fig. 1 Flowchart of the proposed QFD model

2.1 评价用户需求与质量特性的关系

在犹豫模糊二元语义环境下, 设 QFD 团队由 K 个专家成员 $T_k (k=1, 2, \dots, K)$ 组成, 负责对质量屋中用户需求 $C_i (i=1, 2, \dots, m)$ 与质量特性 $Q_j (j=1, 2, \dots, n)$ 组成相互关系进行上下文语法无关的语言评价.

设 $H_k = [h_{ij}^k]_{m \times n}$ 是第 k 个专家的语言评价矩阵, h_{ij}^k 指 QFD 团队成员 T_k 对用户需求和质量特性之间的关系做出犹豫语言表达判断. QFD 团队成员在评价 C_s 与 Q_s 之间不确定关系的操作步骤如下.

步骤 1: 将犹豫模糊语言表达转换为区间二元组. 按照上下文无关语法 G_{GH} , QFD 专家对用户需求和质量特性间相互关系进行模糊语言评价, 并通过转换函数转换为 HFLTSSs.

根据变换函数 E_{GH} 将每个 QFD 团队成员的犹豫语言表述 h_{ig} 转换为相语言区间 $[r_{ij}^k, t_{ij}^k]$, 其中 $r_{ij}^k \in S, t_{ij}^k \in S, S = \{s_i | i=0, 1, 2, \dots, g\}$, 且通过计算每一个 HFLTSSs 的包络, 得到 $r_{ij}^k \leq t_{ij}^k$. 然后运用二元语义表达方法转换为 $[(r_{ij}^k, 0), (t_{ij}^k, 0)]$. 因此将 QFD 专家团队成员的犹豫语言评价信息通过区间二元语义转换为

$$\tilde{R}_k = \begin{bmatrix} r_{11}^k & r_{12}^k & \dots & r_{1n}^k \\ r_{21}^k & r_{22}^k & \dots & r_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1}^k & r_{m2}^k & \dots & r_{nm}^k \end{bmatrix}, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

步骤 2: 构造区间二元组关系矩阵集合. 为了减少偏见或不公平语言评价对 QFD 分析结果的影响, 利用 I_{TOWA} 算子对 QFD 团队成员的主观评价进行汇

总,构建区间二元关系矩阵集合 $\tilde{\mathbf{R}} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n}$. 区间二元组集 $\tilde{r}_{ij} = [(r_{ij}, \alpha_{ij}), (t_{ij}, \epsilon_{ij})] (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ 通过以下方式计算得出:

$$\tilde{r}_{ij} = I_{\text{TOWA}} \omega (\tilde{r}_{ij}^1, \tilde{r}_{ij}^2, \dots, \tilde{r}_{ij}^K) = \bigoplus_{k=1}^K (\omega_k \tilde{r}_{ij}^{\sigma(k)}) = \Delta \left[\sum_{k=1}^K \omega_k \Delta^{-1} (r_{ij}^{\sigma(k)}, \alpha_{ij}^{\sigma(k)}), \sum_{k=1}^K \omega_k \Delta^{-1} (t_{ij}^{\sigma(k)}, \epsilon_{ij}^{\sigma(k)}) \right] \quad (8)$$

式中: $\tilde{r}_{ij}^{\sigma(k)}$ 是第 k 个最大的区间二元组 $\tilde{r}_{ij}^k (k=1, 2, \dots, L)$, $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_L)^T$ 是 I_{TOWA} 算子的权向量, $\omega_k \in [0, 1]$ 和 $\sum_{k=1}^L \omega_k = 1$, 它们的值可以通过基于参数依赖的正态分布法获得^[23]. 利用 I_{TOWA} 算子, 通过对“极端”或“有偏”的意见设置较低权重, 可减轻因不公平语言评价对 QFD 分析结果的影响.

通过对多个 QFD 专家成员单独评价结果的聚合, 生成区间二元关系矩阵集合 $\tilde{\mathbf{R}}$.

$$\tilde{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \tilde{r}_{11} & \tilde{r}_{12} & \dots & \tilde{r}_{1n} \\ \tilde{r}_{21} & \tilde{r}_{22} & \dots & \tilde{r}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{r}_{m1} & \tilde{r}_{m2} & \dots & \tilde{r}_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

需要注意的是, 上述计算中假定质量特性项之间是独立的, 而对于相互间有相关性的情况, 用户需求和质量特性间关系矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}$ 可通过下式调整:

$$\tilde{\mathbf{R}}' = \tilde{\mathbf{R}} \otimes \tilde{\mathbf{C}} \quad (10)$$

式中: $\tilde{\mathbf{C}} = [\tilde{c}_{ij}]_{m \times n}$ 是质量特性的相关性矩阵, 可由技术人员转换为犹豫二元语义术语集. QFD 中质量特性间的相关性关系可以通过调整区间二元组集合 $\tilde{\mathbf{R}}'$ 的关系得到.

2.2 确定用户需求的重要度权重

实际上, QFD 中用户需求项之间并不是相互独立的, 项间存在着各种相互影响关系. 如何根据用户需求项内部的相互影响关系确定各用户需求的相对权重, 是非常重要的且具有意义的. 本文利用 AHP 法在考虑项间相互关系的情况下确定 C_s 的相对重要度. 设 $\mathbf{w} = (w'_1, w'_2, \dots, w'_m)^T$ 是对目标市场上用户代表处调查获取的 C_s 的归一化权重向量, 其中 $w_i \geq 0 (i=1, 2, \dots, m)$ 且 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$.

步骤 3: 确定用户需求的初始权重. 假设用户需求不相关, 对 m 项用户需求进行重要性比较, 并对 C_i 的相对权重从小到大采用 1~9 数值序列表示, 得 $\mathbf{w} = (w'_1, w'_2, \dots, w'_m)^T$, 其中 $w'_i \in [1, 9]$. 利用 AHP 归一化处理得到用户需求初始相对权重 \mathbf{w}_r .

$$\mathbf{w}_r = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T \quad (11)$$

步骤 4: 确定用户需求间重要度关系矩阵 \mathbf{W}_r . 以用户需求 C_i 为例进行说明. 在充分考虑其他用户需求与 C_i 的相互协作与相互冲突关系的基础上, 确定针对 C_i 的其他用户需求间的相对重要度, 得到相对重要度矩阵 \mathbf{W}_G . 其中 $r_{ii} = 1 (i=1, 2, \dots, m)$, $r_{ij} \in [0, 9]$. 当 $r_{ij} \neq 0$ 时, $r_{ij} = 1/r_{ji}$, 当 $r_{ij} = 0$ 时, 取 $r_{jr} = 0$.

利用 AHP 法求得针对 C_i 的其他用户需求间的相对重要度向量 \mathbf{w}_{ri} .

$$\mathbf{w}_{ri} = [w_{1i}, w_{2i}, \dots, w_{ii}, \dots, w_{mi}]^T \quad (12)$$

式中: $\sum_{j=1}^m \omega_{ji} = 1$.

依此类推, 求出针对其他用户需求的相对重要度向量. 将针对各用户需求的相对重要度向量组合在一起构成 C_s 间的重要度关系矩阵 \mathbf{W}_r .

步骤 5: 计算考虑相关性的用户需求重要度权重 \mathbf{w}_C . 考虑了用户需求间相关关系的用户需求权重 \mathbf{w}_C 的计算如下:

$$\mathbf{w}_C = \mathbf{W}_r \mathbf{w}_r = [w_{C1}, w_{C2}, \dots, w_{Cm}]^T \quad (13)$$

式中: \mathbf{w}_r 为不考虑用户需求间相关性时的权重向量.

2.3 确定质量特性的重要度排序

为了确定质量特性项 (Q_s) 的重要度级别, 提出一种结合犹豫二元语义变量的多属性决策 TOPSIS (HTL-TOPSIS) 方法. 该方法首先将所有语言评价转换为犹豫二元语义表达, 并进一步转换为区间二元语义组矩阵, 计算二元语义组的正负理想解 (A^+ , A^-), 然后计算各正负理想解的距离 (D_i^+ , D_i^-), 确定各候选项与理想解的相对接近程度 (R_i^+), 最后根据 R_i^+ 值的大小排序确定 Q_s 的重要度.

步骤 6: 确定二元语义组的正负理想解. 二元语义组的正理想解 (最优) 和负理想解 (最劣) 的计算方式如下:

$$A^+ = [(r_1^+, \alpha_1^+), (r_2^+, \alpha_2^+), \dots, (r_n^+, \alpha_n^+)] \quad (14)$$

$$A^- = [(r_1^-, \alpha_1^-), (r_2^-, \alpha_2^-), \dots, (r_n^-, \alpha_n^-)] \quad (15)$$

其中

$$(r_j^+, \alpha_j^+) = \begin{cases} \max_i \{ (t_{ij}, \epsilon_{ij}) \}, & \text{收益标准} \\ \min_i \{ (s_{ij}, \alpha_{ij}) \}, & \text{成本标准} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

$$(r_j^-, \alpha_j^-) = \begin{cases} \min_i \{ (s_{ij}, \alpha_{ij}) \}, & \text{成本标准} \\ \max_i \{ (t_{ij}, \epsilon_{ij}) \}, & \text{收益标准} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (17)$$

步骤 7: 计算正负理想解的距离. 通过计算基于区间二元组的 n 维欧式距离, 可以获取各个方案到

二元语义正负理想解的距离 D_i^+ 和 D_i^- , 计算公式如下:

$$D_i^+ = \left(\sum_{j=1}^n ((\Delta^{-1}(s'_{ij}, \alpha'_{ij}) - \Delta^{-1}(r_j^+, \alpha_j^+))^2 + (\Delta^{-1}(t'_{ij}, \epsilon'_{ij}) - \Delta^{-1}(r_j^+, \alpha_j^+))^2)^{\frac{1}{2}}, \right. \\ \left. i = 1, 2, \dots, m \right. \quad (18)$$

$$D_i^- = \left(\sum_{j=1}^n ((\Delta^{-1}(s'_{ij}, \alpha'_{ij}) - \Delta^{-1}(r_j^-, \alpha_j^-))^2 + (\Delta^{-1}(t'_{ij}, \epsilon'_{ij}) - \Delta^{-1}(r_j^-, \alpha_j^-))^2)^{\frac{1}{2}}, \right. \\ \left. i = 1, 2, \dots, m \right. \quad (19)$$

步骤 8: 计算与二元语义理想解的相对贴近度. 每个候选指标 A_i 与二元语义理想解 A^+ 的相对贴近程度可通过如下公式获取:

$$R_i^+ = \Delta \left(\frac{\Delta^{-1}(D_i^-)}{\Delta^{-1}(D_i^+) + \Delta^{-1}(D_i^-)} \right), 0 \leq \Delta^{-1}(R_i^+) \leq 1 \quad (20)$$

步骤 9: 确定 Q_s 的最终优先级顺序. 根据与理想解的相对贴近度, R_i^+ 的值越大, A_i 越优. 根据相对贴近度的值降序排列对所有的 $A_i (i=1, 2, \dots, m)$ 进行优先级排序.

3 模型应用与分析

3.1 案例应用

某 L 企业是一家从事外语教育多媒体软件开发的公司, 公司早期的一款以听写训练为主的语言学习 E-learning 系统产品在江浙沪等地多所高校均有所安装, 为免修、免考学生自主学习使用. 产品投入市场初期, 产品的使用率和满意度较高, 但随着移动学习应用的快速发展和用户学习习惯的改变, 该产品无法满足用户需求, 面临着转型和质量提升的紧迫问题. 为了维持原有市场地位和适应客户习惯, 公司决定重新定义用户需求并依此进行产品的创新设计. 由于资源有限, 企业必须确定产品各质量特性的重要度优先级, 以便于合理分配资源和设计产品, 最大限度满足用户需求. 因此, 以该语言学习 E-learning 系统为例, 运用本文所提的改进 QFD 方法确定其用户需求的质量特性重要度排序, 为企业改进同类产品提供参考依据.

首先, 通过前期对用户需求进行初步筛选和精简后, 确定进入 HOQ 的 5 项关键用户需求, 分别为: 资源量大面广 (C_1)、内容质量高 (C_2)、功能设计合理 (C_3)、系统安全可靠 (C_4)、响应速度快 (C_5). 确

定进入 HOQ 的 6 项关键质量特性, 分别为: 丰富性 (Q_1)、优质性 (Q_2)、功能性 (Q_3)、易用性 (Q_4)、效率性 (Q_5)、可靠性 (Q_6). 确定该学习系统设计 QFD 团队成员由 5 位不同领域的专家组成, 包括产品技术主管 (1 名)、市场专员 (1 名)、专业教师 (1 名) 和学生用户 (2 名), 设团队成员为 $T_k (k=1, 2, \dots, 5)$ 以便于对 QFD 中的重要度和相关关系进行量化分析. 每一位 QFD 团队成员都会分析用户需求与质量特性之间的重要度比较关系并进行评价, 采用语法不相关方式进行表达. 设专家评价信息所采用语言术语集合 S 为

$$S = \{s_0 = VL, s_1 = L, s_2 = ML, s_3 = M, \\ s_4 = MH, s_5 = H, s_6 = VH\}$$

从 VL 至 VH 分别表示语言评价的 7 个级别, 分别为: 非常低、低、中低、中、中高、高、非常高.

步骤 1: 每个 QFD 团队成员对用户需求与质量特性之间关系的语言评价表达情况见表 1. 在获取 QFD 团队成员犹豫语言表达后, 首先应用转换函数 E_{GH} 将 QFD 团队成员的犹豫语言表达转化为 HFLTSs. 然后通过计算每个成员语言评价形成 $e_{mv}(H_S)$ 包络和区间二元语义关系矩阵 $\tilde{R}_k (k=1, 2, \dots, 5)$, 确定专家成员的语言评价区间值, 如专家成员 T_1 的区间二元组关系矩阵 \tilde{R}_1 , 见表 2.

步骤 2: 通过运用 I_{TOWA} 算子, 构建 QFD 团队对用户需求和质量特性之间关系评价的区间二元关系矩阵集 $\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]$, 见表 3. 其中 I_{TOWA} 算子的权值 $(0.112, 0.236, 0.304, 0.236, 0.112)$ 通过基于正态分布的参数相关方法获取.

在第 2 阶段, 根据用户需求间的相互影响关系, 计算用户需求的相对重要度 w_c , 具体步骤如下.

步骤 3: 确定用户需求的相对权重. 假设用户需求不相关, 采用 1~9 数值序列表示, 对 5 项用户需求进行比较, 得 $(C_1, C_2, C_3, C_4, C_5) = (3, 7, 9, 5, 1)$, 归一化处理得到用户需求相对权重向量 $w_r = [0.12, 0.28, 0.36, 0.20, 0.04]^T$.

步骤 4: 确定用户需求间重要度关系矩阵 W_r . 以用户需求“响应速度快 (C_5)”为例, 计算其与其他需求项的内在相互依赖关系. 即假设在可能遇到的问题, 在调节“响应速度快”时, 用户需求“资源量大面广”与“系统安全可靠”相比, 哪个更重要. 于是得到一个互相比较方阵, 方阵中元素间的相互关系用 1~9 来度量, “1”代表 2 个元素同等重要, “9”代表一个元素相对另一个元素极为重要. 方阵中元素的重要度关系满足 $a_{ij} = 1/a_{ji}$, 其中, a_{ij} 表示第 i 个元素相

表 1 专家对用户需求与质量特性关系的语言评价

Tab.1 Linguistic assessment on the relationship between C_s and Q_s by the QFD team

| 用户需求 | 专家 | 质量特性 | | | | | |
|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | Q_1 | Q_2 | Q_3 | Q_4 | Q_5 | Q_6 |
| C_1 | T_1 | VH | >H | L | M | ML | VL |
| | T_2 | H | \geq M | VL | <M | \leq ML | VL |
| | T_3 | H~VH | MH | VL~L | L | L | L |
| | T_4 | >MH | M | <M | \leq M | L~ML | VL |
| | T_5 | H | \leq MH | <L | ML | L | <L |
| C_2 | T_1 | MH | VH | \leq L | L<M | L | L |
| | T_2 | MH | VH | ML | M | \leq ML | ML |
| | T_3 | \geq MH | VH | VL~L | M~ML | <ML | <L |
| | T_4 | MH | H~VH | VL | ML | ML~M | \leq L |
| | T_5 | H | \geq H | <L | ML | L | L |
| C_3 | T_1 | VL | VL | H~VH | MH | M~MH | \leq ML |
| | T_2 | VL | VL | VH | \geq M | MH | MH |
| | T_3 | VL~L | L | VH | H | H | L~ML |
| | T_4 | VL | <L | >MH | MH | >M | \leq M |
| | T_5 | <L | VL | H | VH | MH | \leq ML |
| C_4 | T_1 | L | <L | L | ML~M | VL~L | VH |
| | T_2 | VL | \leq L | L | MH | \leq L | H~VH |
| | T_3 | VL~L | VL | VL~L | M | ML | VH |
| | T_4 | VL | VL | \leq ML | \leq M | VL | \geq H |
| | T_5 | <L | VL | <L | ML | <L | VH |
| C_5 | T_1 | VL | VL | ML~M | \leq MH | >H | L~ML |
| | T_2 | VL~L | VL | M | MH | VH | VL |
| | T_3 | L | L | \geq M | H | H~VH | ML |
| | T_4 | VL~L | <L | >ML | MH | H | \leq ML |
| | T_5 | <L | VL | ML | \geq M | VH | L |

表 2 T_i 的区间二元组关系矩阵

Tab.2 Interval 2-tuple relationship matrix of T_i

| 用户需求 | 专家 | Q_1 | Q_2 | Q_3 | Q_4 | Q_5 | Q_6 |
|-------|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| C_1 | T_1 | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_3, 0), (s_3, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ |
| | T_2 | $[(s_5, 0), (s_5, 0)]$ | $[(s_3, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_3, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ |
| | T_3 | $[(s_5, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_4, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ |
| | T_4 | $[(s_4, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_3, 0), (s_3, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_3, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ |
| | T_5 | $[(s_5, 0), (s_5, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ |
| C_2 | T_1 | $[(s_4, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ |
| | T_2 | $[(s_4, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_3, 0), (s_3, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ |
| | T_3 | $[(s_4, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_3, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ |
| | T_4 | $[(s_4, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_5, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_3, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ |
| | T_5 | $[(s_5, 0), (s_5, 0)]$ | $[(s_5, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ |
| C_3 | T_1 | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_5, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_4, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_3, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ |
| | T_2 | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_3, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_4, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_4, 0), (s_4, 0)]$ |
| | T_3 | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_5, 0), (s_5, 0)]$ | $[(s_5, 0), (s_5, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ |
| | T_4 | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_5, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_4, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_3, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_3, 0)]$ |
| | T_5 | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_5, 0), (s_5, 0)]$ | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_4, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ |
| C_4 | T_1 | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_3, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ |
| | T_2 | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_4, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_5, 0), (s_6, 0)]$ |
| | T_3 | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_3, 0), (s_3, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ |
| | T_4 | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_3, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_5, 0), (s_6, 0)]$ |
| | T_5 | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ |
| C_5 | T_1 | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_3, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ |
| | T_2 | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_3, 0), (s_3, 0)]$ | $[(s_4, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ |
| | T_3 | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_3, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_5, 0), (s_5, 0)]$ | $[(s_5, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ |
| | T_4 | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_3, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_4, 0), (s_4, 0)]$ | $[(s_5, 0), (s_5, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_1, 0)]$ |
| | T_5 | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_0, 0), (s_0, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ | $[(s_3, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_6, 0), (s_6, 0)]$ | $[(s_1, 0), (s_1, 0)]$ |

表 3 集成的区间二元组关系矩阵

Tab.3 Collective interval 2-tuple relationship matrix

| 用户需求 | 质量特性 | | | | | | 权重 |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
| | Q ₁ | Q ₂ | Q ₃ | Q ₄ | Q ₅ | Q ₆ | |
| C ₁ | Δ[0.833, 0.942] | Δ[0.539, 0.764] | Δ[0.019, 0.127] | Δ[0.185, 0.423] | Δ[0.167, 0.275] | Δ[0.019, 0.019] | 0.096 |
| C ₂ | Δ[0.685, 0.743] | Δ[0.942, 1.000] | Δ[0.037, 0.167] | Δ[0.315, 0.391] | Δ[0.127, 0.294] | Δ[0.127, 0.167] | 0.280 |
| C ₃ | Δ[0.000, 0.112] | Δ[0.112, 0.112] | Δ[0.891, 0.981] | Δ[0.762, 0.852] | Δ[0.664, 0.762] | Δ[0.207, 0.466] | 0.360 |
| C ₄ | Δ[0.019, 0.058] | Δ[0.000, 0.019] | Δ[0.058, 0.167] | Δ[0.373, 0.500] | Δ[0.037, 0.127] | Δ[0.942, 1.000] | 0.206 |
| C ₅ | Δ[0.019, 0.109] | Δ[0.019, 0.019] | Δ[0.442, 0.655] | Δ[0.571, 0.743] | Δ[0.942, 0.981] | Δ[0.127, 0.257] | 0.058 |

对于第 j 个元素的重要度, $a_{ii} = 1$ 用于保持两两相互比较矩阵的重要度权重. 在互相关矩阵基础上, 采用 AHP 法计算各元素的重要度权重.

具体计算结果如表 4 所示, 表中最右列为计算得到的针对“响应速度快(C₅)”的用户需求项之间的相对重要度向量. 其中, 与“响应速度快”没有相关关系的需求未列在表中.

表 4 针对 C₅ 的用户需求间相互关系矩阵

Tab.4 Relationship matrix of C₅

| C ₅ | C ₅ | C ₁ | C ₄ | 相对重要度 |
|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|
| C ₅ | 1 | 3 | 1/7 | 0.158 |
| C ₁ | 1/3 | 1 | 1/7 | 0.076 |
| C ₄ | 7 | 7 | 1 | 0.766 |

由表 4 可得, 针对“响应速度快”的用户需求间相互关系重要度向量 w_{r7} 为

$$w_{r7} = [0.158, 0, 0, 0.766, 0.076]^T$$

依此类推, 求出其他需求项的用户需求间相互关系重要度向量, 将得到的向量按照用户需求集的顺序组合成用户需求间重要度关系矩阵 W_r .

$$W_r = \begin{bmatrix} 0.750 & 0 & 0 & 0 & 0.158 \\ 0 & 1.000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.875 & 0.766 \\ 0.250 & 0 & 0 & 0.125 & 0.076 \end{bmatrix}$$

步骤 5: 计算考虑了用户需求相关性的用户需求权重 w_c .

$$w_c = W_r \cdot w_r = [0.096, 0.280, 0.360, 0.206, 0.058]^T$$

通过考虑 C₅ 的相关性, 最终确定的用户需求集各项的相对权重为: $w_c = [0.096, 0.280, 0.360, 0.206, 0.058]^T$, 见表 3.

在第 3 阶段, 结合第 2 阶段确定的 C_s 权重, 运用 TOPSIS 方法对二元语言组矩阵求最接近理想解的候选质量特性指标, 并通过对综合的接近理想解

的程度进行优先顺序排序.

步骤 6: 计算二元语义组的正负解. 通过考虑各 C_s 的权重, 利用式(14)~(17) 计算二元语义组的正负理想解的值分别为

$$A^+ = \Delta(0.08, 0.09), \Delta(0.264, 0.28), \Delta(0.321, 0.353), \Delta(0.194, 0.206), \Delta(0.055), \Delta(0.057)$$

$$A^- = \Delta(0.002, 0.002), \Delta(0.010, 0.047), \Delta(0, 0.04), \Delta(0, 0.04), \Delta(0.001), \Delta(0.001)$$

步骤 7: 通过式(18)~(19), 计算各 Q_s 与二元语义正负理想解的距离 D_i^+ 和 D_i^- (见表 5).

步骤 8: 通过式(20)计算的各 Q_s 与理想解的相对接近程度 R_i^+ 的值分别为 0.334、0.411、0.506、0.576、0.451、0.404, 见表 5.

表 5 HTL-TOPSIS 方法的计算结果

Tab.5 Results of the HTL-TOPSIS method

| 编号 | D _i ⁺ | D _i ⁻ | R _i ⁺ | 排序 |
|----------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----|
| Q ₁ | 0.539 | 0.270 | 0.334 | 6 |
| Q ₂ | 0.512 | 0.358 | 0.411 | 4 |
| Q ₃ | 0.441 | 0.452 | 0.506 | 2 |
| Q ₄ | 0.309 | 0.420 | 0.576 | 1 |
| Q ₅ | 0.423 | 0.348 | 0.451 | 3 |
| Q ₆ | 0.469 | 0.318 | 0.404 | 5 |

步骤 9: 通过比较 R_i^+ 值可得到质量特性的重要性的由大到小排序为 Q₄、Q₃、Q₅、Q₂、Q₆、Q₁. 因此, 本案例中对数字语言学习系统的产品设计阶段来说, 最重要的质量特性是易用性(Q₄), 在后续产品规划设计中应给予最高优先级, 其次依次是功能性(Q₃)、效率性(Q₅)、优质性(Q₂)、可靠性(Q₆)、丰富性(Q₁).

3.2 比较与讨论

为进一步验证所提改进 QFD 模型的有效性, 就案例中 E-learning 系统质量特性重要度排序问题, 将本文所提方法与其他改进方法, 如组合质量屋(combined house of quality, CHOQ)法, 进行比较分

析,得到的 Q_s 的优先排序结果如表 6 所示。

表 6 改进质量功能展开方法计算结果比较
Tab.6 Ranking results by listed improved QFD

| 质量特性 | CHOQ | | 所提方法 |
|-------|-------|----|------|
| | W_j | 级别 | |
| Q_1 | 0.034 | 6 | 6 |
| Q_2 | 0.149 | 4 | 4 |
| Q_3 | 0.270 | 2 | 2 |
| Q_4 | 0.290 | 1 | 1 |
| Q_5 | 0.100 | 5 | 3 |
| Q_6 | 0.158 | 3 | 5 |

根据表 6 的结果比较可知,结合犹豫二元语义变量、AHP 和 TOPSIS 改进的 QFD 对 Q_s 的优先级排序与 CHOQ 方法的排序整体保持一致(首尾项),验证了该方法的整体有效性。质量特性项中间部分的排序有所差异,恰好体现了专家权重信息和用户需求权重对排序结果的影响,从而体现了本文所提方法更加适用于犹豫不确定语言环境下的多目标决策问题。相比以往的 QFD 改进,本文提出的改进 QFD 模型的主要优势有以下三点:

(1) 该方法使用 HFLTSs,可以较好地反映出 QFD 团队成员的各种犹豫不确定语言表达,避免信息丢失,从而 QFD 团队成员可以使用更加灵活丰富的语言、更加真实表达各自的主观判断。

(2) 该方法通过 AHP 法,能够快速识别用户需求间的相互影响关系,确定其重要度的相对权重问题。相比不考虑相关性的理想情况,该方法更加实用和科学,能够准确识别复杂关系,更适用于真实案例的分析。

(3) 提出结合二元语义的改进 TOPSIS,相比单纯一维数值的计算,结合二元语义的算法更能反映专家真实的决策意见,从而使得到的质量特性重要度排序更加准确可信,有利于对质量特性规划目标做出正确的决策。

4 结语

质量特性重要度的确定是 E-learning 系统方案设计的关键,QFD 作为一种用户需求导向的产品设计工具,通过质量屋的构建能够有效计算出质量特性的重要度级别。针对传统 QFD 专家语言评价模糊不确定等问题,本文提出一种结合 HFLTSs、AHP 和 TOPSIS 的改进 QFD,用以确定产品质量特性重要度排序。该方法主要特点有:①通过 HFLTSs 处理犹豫语言评价信息,有效避免了信息丢失问题。②通过 AHP 确定用户需求重要度相对权重,在体现需

求内部相互影响关系的同时有效减少误差。③采用结合二元语义的 TOPSIS 确定质量特性的重要度优先级,提高了决策结果的准确性和科学性。

通过对某企业一款语言类 E-learning 系统质量特性重要度的确定分析,验证了所提方法的有效性和可行性。与其他改进 QFD 比较得出,所提方法计算的结果是有效和可靠的,且在解决犹豫语言环境和考虑相关性情况下的决策问题更具优势。由于评价信息处理模糊性还具随机性等特点,下一步可以结合同时考虑模糊性和随机性的多属性决策方法进行模型的进一步改进和优化。

改进 QFD 方法的案例研究表明,在 E-learning 系统质量特性中,易用性的重要度排序最高,建议企业在产品研发设计时,优先考虑与易用性相关的功能和服务设计。同时,建议企业以用户为中心进行产品研发,不仅要关注功能模块的具体设计和软件技术的编程实现,更应该关注用户需求在产品质量中的体现程度。在互联网教育生态环境下,运用科学有效的方法和工具对用户需求的精准挖掘和在产品质量特性中的精准体现,有助于提高 E-learning 系统的设计质量水平和市场竞争力。

参考文献:

- [1] 熊伟. 质量机能展开[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
XIONG Wei. Quality function deployment [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [2] HAUSER J R C D. The house of quality[J]. Harvard Business Review, 1988, 66(3): 63.
- [3] RODRIGUEZ R M, MARTINEZ L, HERRERA F. Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2012, 20(1):109.
- [4] LIAO H, XU Z, ZENG X J. Hesitant fuzzy linguistic VIKOR method and its application in qualitative multiple criteria decision making[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(5):1343.
- [5] TÜYSÜZ F, ŞİMŞEK B. A hesitant fuzzy linguistic term sets-based AHP approach for analyzing the performance evaluation factors: An application to cargo sector [J]. Complex & Intelligent Systems, 2017, 3 (2):1.
- [6] HERRERA F, MARTINEZ L. A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2000, 8(6):746.
- [7] SANTOS L F D O M, OSIRO L, LIMA R H P. A model based on 2-tuple fuzzy linguistic representation and Analytic Hierarchy Process for supplier segmentation using qualitative and quantitative criteria [J]. Expert Systems with Applications, 2017, 79:53.
- [8] 冯向前,刘琦,魏翠萍. 基于犹豫模糊二元语义的多属性决策方法[J]. 运筹与管理, 2018, 27(1):17.

- FENG Xiangqian, LIU Qi, WEI Cuiping. Hesitant fuzzy 2-tuple linguistic multiple attribute decision making method [J]. *Operations Research & Management Science*, 2018, 27(1):17.
- [9] LIU C H, WU H H. A fuzzy group decision-making approach in quality function deployment[J]. *Quality & Quantity*, 2008, 42(4):527.
- [10] XUE Y X, YOU J X, ZHAO X, et al. An integrated linguistic MCDM approach for robot evaluation and selection with incomplete weight information [J]. *International Journal of Production Research*, 2016, 54(18):1.
- [11] WANG Z L, YOU J X, LIU H C. Uncertain quality function deployment using a hybrid group decision making model[J]. *Symmetry*, 2016, 8(11):119.
- [12] WU S M, LIU H C, WANG L E. Hesitant fuzzy integrated MCDM approach for quality function deployment; A case study in electric vehicle [J]. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(15):4436.
- [13] SONG W, MING X, HAN Y. Prioritising technical attributes in QFD under vague environment; A rough-grey relational analysis approach [J]. *International Journal of Production Research*, 2014, 52(18):5528.
- [14] HWANG C L, YOON K. Multiple attribute decision making [M]. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg Press, 1981.
- [15] LI D F. TOPSIS-based nonlinear-programming methodology for multiattribute decision making with interval-valued intuitionistic fuzzy sets [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2010, 18(2):299.
- [16] LIANG D, XU Z. The new extension of TOPSIS method for multiple criteria decision making with hesitant pythagorean fuzzy sets[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 60(11):167.
- [17] MOUSAVI-NASAB S H, SOTOUDEH-ANVARI A. A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems [J]. *Materials & Design*, 2017, 121(9):237.
- [18] YUSUF Tansel iç. Development of a new multi-criteria optimization method for engineering design problems [J]. *Research in Engineering Design*, 2016, 27(4):413.
- [19] YAGER R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1988, 18(1):80.
- [20] MERIGÓ J M, GIL-LAFUENTE A M. New decision-making techniques and their application in the selection of financial products[J]. *Information Sciences*, 2010, 180(11):2085.
- [21] XU Y, XU A, MERIGÓ J M, et al. Hesitant fuzzy linguistic ordered weighted distance operators for group decision making [J]. *Journal of Applied Mathematics & Computing*, 2015, 49(1/2):285.
- [22] LIU H C, REN M L, WU J, et al. An interval 2-tuple linguistic MCDM method for robot evaluation and selection[J]. *International Journal of Production Research*, 2014, 52(10):2867.
- [23] WU J, LIANG C Y, HUANG Y Q. An argument-dependent approach to determining OWA operator weights based on the rule of maximum entropy [J]. *International Journal of Intelligent Systems*, 2007, 22(2):20.