

DOI:10.11918/201907218

概率语言环境下考虑专家心理行为的 QFD 方法

鞠萍华, 陈 资, 冉 琰, 涂顺泽

(机械传动国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘 要:为解决传统质量功能展开(QFD)在实际运用过程中存在关于顾客需求和工程技术之间的关系评估,顾客需求权重的确定和工程技术的优先级排序等方面的固有缺陷,提出一种概率语言环境下考虑专家心理行为的 QFD 方法.运用概率语言连乘层次分析法(PL-MAHP)确定顾客需求初始权重,针对顾客需求之间的关联关系,运用模糊认知图(FCM)对顾客需求进行推理分析并获取其最终权重;为有效地处理 QFD 团队专家评估信息中的模糊性和不确定性,使用概率语言术语集(PLTS)表征顾客需求和工程技术之间的关联强度,并将交互式多属性决策(TODIM)拓展到概率语言环境中,依据各个工程技术的全局占优度来最终确定工程技术的重要度,充分考虑了专家心理行为对工程技术的优先级排序的影响.在电动汽车产品开发实例中运用本文方法结果表明,该方法能合理有效地确定最终重要度.与现有其他方法对比分析,验证了本文方法的优越性.

关键词:质量功能展开;概率语言术语集;交互式多属性决策;模糊认知图;工程技术;顾客需求

中图分类号: N94

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)07-0193-08

A novel QFD method considering expert's psychological behavior character under probabilistic linguistic environment

JU Pinghua, CHEN Zi, RAN Yan, TU Shunze

(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: To overcome some inherent drawbacks regarding the assessment of relationships between customer requirements and engineering characteristics, the determination of customer requirements weights and the prioritization of engineering characteristics in application of traditional QFD method, a novel QFD method considering expert's psychological behavior character under probabilistic linguistic environment was proposed. Firstly, the initial weights of customer requirements were determined by using the probabilistic linguistic multiplicative analytic hierarchy process (PL-MAHP). With respect to the interrelationships among customer requirements into account, fuzzy cognitive map (FCM) was used to analyze and determine their final weights. Secondly, the probabilistic linguistic sets (PLTS) was applied to express the uncertainty and hesitancy of subjective assessments in evaluating the interrelations between customer requirements and engineering characteristics. in addition, the TODIM method was extended to probabilistic linguistic environment, the overall dominance of engineering characteristics was utilized to determine the importance ranking of engineering characteristics considering the psychological behaviors of decision makers. Finally, the proposed QFD method was applied in an empirical case concerning the product development of electric vehicle, the results proved that the method can effectively prioritise engineering characteristics in QFD, and comparison study with other relevant methods was also performed to show its merits.

Keywords: quality function deployment (QFD); probabilistic linguistic sets (PLTS); interactive multi-attribute decision making (TODIM); fuzzy cognitive map (FCM); engineering characteristics; customer requirement

质量功能展开(Quality function deployment, QFD)是一种用于将产品顾客需求(Customer Requirements, CRs)转为工程技术(Engineering Characteristics, ECs)的产品规划方法^[1],尽管传统QFD方法因其简单易操作的特点而被广泛应用于

汽车、电子和服务等各个领域^[2-4],但在实际应用中仍存在许多问题.本文主要关注的问题有:1)使用清晰的数值量化顾客需求和工程技术之间的关联程度,无法描述专家评估信息的模糊性和不确定性;2)确定顾客需求权重时忽略了顾客需求之间存在的关联关系;3)使用加权平均算法推导工程技术的重要度,忽略专家有限理性的心理行为,不适用于对工程技术重要度的精确排序.

针对问题1),三角模糊数^[5]、犹豫模糊集^[2]、区间直觉模糊数^[6]、直觉模糊集^[7]和毕达哥拉斯模糊

收稿日期: 2019-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(51835001,51705048);国家重大科技专项(2018ZX04032-001,2016ZX04004-005)

作者简介: 鞠萍华(1974—),男,副教授,硕士生导师

通信作者: 冉 琰, ranyan@cqu.edu.cn

集^[8]等模糊集理论被广泛应用于表征顾客需求和工程技术关联强度。但在实际应用过程中,由于人类认知的固有模糊性和不确定性,QFD 团队专家更倾向于使用语言术语(Linguistic Term Set, LTS)进行判断评估,作为犹豫模糊语言集(Hesitant Fuzzy Linguistic Term Set, HFLTS)^[9]的拓展。文献[10]提出的概率语言术语集(Probabilistic Linguistic Term Sets, PLTS)不仅包含决策专家对多个语言术语的犹豫信息,而且还可以通过对不同语言术语增加概率信息来反映不同程度的偏好,有效地避免了偏好信息的丢失,提高了语言信息表达的灵活性,更加适用于描述专家评估信息的模糊性和不确定性^[11]。

针对问题 2),当前研究主要使用决策实验与评估法(decision making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)和网络分析法(analytic network process, ANP)刻画顾客需求间的关联关系,文献[12]提出集成 DEMATEL 和复杂比例评估法(complex proportional assessment, COPRAS)的 QFD 模型,研究了顾客需求间自相关关系对工程技术重要度确定的影响。文献[2]运用犹豫模糊 DEMATEL 分析顾客需求间的相互关系并确定其权重。文献[13]对顾客需求间存在的关联关系问题,提出综合 ANP 和 QFD 供应商选择模型,尽管 DEMATEL 和 ANP 是分析因素关联行为的有效工具,但存在专家多次主观判断易产生不一致性,不能描述顾客需求间存在正、负因果影响关系和顾客需求动态变化特性等问题。

针对问题 3),QFD 方法中工程技术重要度排序问题可以被视为一种多属性决策问题(multiple criteria decision making, MCDM),因此, COPRAS^[12]、偏好结构排序法^[14]和灰色关联法^[15]等 MCDM 方法已被用于确定工程技术重要度。文献[16]提出的 TODIM 方法是一种基于前景理论价值函数为基础的有效行为决策方法,相比于其他 MCDM 方法,TODIM 充分考虑了专家有限理性的心理行为对工程技术重要度排序的影响,使得工程技术重要度排序结果更加合理可靠。

本文提出了一种概率语言环境下考虑专家心理行为的 QFD 方法,该方法综合考虑专家主观经验知识和顾客需求间自相关两方面因素,结合概率语言连乘层次分析法(probabilistic linguistic multiplicative analytic hierarchy process, PL-MAHP)和模糊认知图(fuzzy cognitive map, FCM)确定顾客需求权重,利用 PLTS 评估顾客需求和工程技术之间的关联程度,并基于 PL-TODIM 确定工程技术重要度。最后将本文所提的 QFD 方法应用于电动汽车产品开发实例中,验证了该方法的有效性和适用性。

1 概率语言术语集

定义 1^[10] 设 LTS 为 $S = \{s_\alpha \mid \alpha = -\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau\}$, 为了描述专家评估时的犹豫和不确定性,定义一个概率语言术语集 PLTS 为

$$L(p) = \{L^{(l)}(p^{(l)}) \mid L^{(l)} \in S, p^{(l)} \geq 0, l = 1, 2, \dots, \#L(p), \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)} \leq 1\}.$$

式中: $L^{(l)}(p^{(l)})$ 为概率信息为 $p^{(l)}$ 的语言术语 $L^{(l)}$, $\#L(p)$ 为所有 $L(p)$ 中包含的语言术语的数目。

1.1 PLTS 的标准化

定义 2^[10] 若 PLTS 中 $\sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)} < 1$, 则概率信息标准化的 PLTS $\bar{L}(p)$ 定义为

$$\bar{L}(p) = \{L^{(l)}(\bar{p}^{(l)}) \mid l = 1, 2, \dots, \#L(p)\}.$$

式中: $\bar{p}^{(l)} = p^{(l)} / \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)}$, 令 $\alpha^{(l)}$ 是语言术语 $L^{(l)}$ 的下标, 则 PLTS 内所有元素按照 $\alpha^{(l)} p^{(l)}$ 的值升序排列; 若 PLTS 内含有两个或多个具有相等 $\alpha^{(l)} p^{(l)}$ 值的元素, 则按 $\alpha^{(l)}$ 的值升序排列。

定义 3^[10] $L_1(P) = \{L_1^{(l)}(p_1^{(l)}) \mid l = 1, 2, \dots, \#L_1(p)\}$ 和 $L_2(P) = \{L_2^{(l)}(p_2^{(l)}) \mid l = 1, 2, \dots, \#L_2(p)\}$ 是两个不同的 PLTS, 若 $\#L_1(p) > \#L_2(p)$, 则将 $\#L_1(p) - \#L_2(p)$ 个语言术语添加到 $L_2(p)$ 中, 其中添加的语言术语是 $L_2(p)$ 中最小的语言术语, 且其概率为 0, 使得 $L_1(p)$ 和 $L_2(p)$ 中包含的语言术语数相等。

基于定义 2 和定义 3, 可以获得标准化的 PLTS, $\bar{L}(p) = \{L^{(l)}(\bar{p}^{(l)}) \mid l = 1, 2, \dots, \#L(p)\}$, 其中 $\bar{p}^{(l)} = p^{(l)} / \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)}$ 。

1.2 PLTS 的集聚

定义 4^[17] 设 $M = \{M_q \mid q = 1, 2, \dots, Q\}$ 是由 Q 位专家组成的专家团队, 其权重向量为 $[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_Q]^T$, 且满足 $\sum_{q=1}^Q \lambda_q = 1$ 。专家 M_q 提供的 PLTS 为 $L^q(p) = \{L_\alpha^q(p_\alpha^q) \mid L_\alpha^q \in S\}$, 其中 p_α^q 为语言术语 L_α^q 的概率信息, 则综合 PLTS 为

$$L(p) = \{L_\alpha^{(l)}(p^{(l)}) \mid L_\alpha^{(l)} \in S, p^{(l)} = \sum_{q=1}^Q v_\alpha^q \lambda_q, l = 1, 2, \dots, \#L(p)\}. \quad (1)$$

式中: v_α^q 为 $L^q(p)$ 中语言术语 L_α^q 的权重

$$v_\alpha^q = \begin{cases} p_\alpha^q, & \text{if } L_\alpha^q \in L^q(p); \\ 0, & \text{if } L_\alpha^q \notin L^q(p). \end{cases} \quad (2)$$

例 1 假设 3 位专家提供的 PLTS 分别为 $L^1(p) = \{s_1(0.5), s_2(0.5)\}$, $L^2(p) = \{s_2(0.8), s_3(0.2)\}$, $L^3(p) = \{s_2(1)\}$, 专家权重向量为 $[0.3, 0.2, 0.5]^T$, 则依据定义 4 聚集得到的综合 PLTS 为 $L(p) = \{s_1(0.15), s_2(0.81), s_3(0.04)\}$ 。

1.3 PLTS 间的比较

定义 5^[17] 设基于 $S = \{s_\alpha \mid \alpha = -\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau\}$ 的 PLTS 为 $L(p) = \{L^{(l)}(p^{(l)}) \mid l = 1, 2, \dots, \#L(p)\}$, $\alpha^{(l)}$ 是语言术语 $L^{(l)}$ 的下标, 则其期望值 $E(L(p))$ 和方差值 $\sigma(L(p))$ 分别定义为

$$E(L(p)) = \sum_{l=1}^{\#L(p)} (\frac{\alpha^{(l)} + \tau}{2\tau} p^{(l)}) / \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)},$$
$$\sigma(L(p)) = (\sum_{l=1}^{\#L(p)} ((\frac{\alpha^{(l)} + \tau}{2\tau} E(L(p)))^2 p^{(l)}) / \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)})^{1/2}.$$

利用期望值 $E(L(p))$ 和方差值 $\sigma(L(p))$ 构造 PLTS 的大小比较规则: 若 $E(L_1(p)) > E(L_2(p))$, 则 $L_1(p) > L_2(p)$; 若 $E(L_1(p)) = E(L_2(p))$, 则进行方差值的比较, 若 $\sigma(L_1(p)) > \sigma(L_2(p))$, 则 $L_1(p) < L_2(p)$; 如果 $\sigma(L_1(p)) = \sigma(L_2(p))$, 则 $L_1(p) = L_2(p)$.

1.4 PLTS 间的距离

定义 6^[18] 设 LTS 为 $S = \{s_\alpha \mid \alpha = -\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau\}$ 的任意两个不同标准化 PLTS 分别为

$$\bar{L}_1(p) = \{\bar{L}_1^{(l)}(\bar{p}_1^{(l)}) \mid l = 1, 2, \dots, \#\bar{L}_1(p)\},$$
$$\bar{L}_2(p) = \{\bar{L}_2^{(l)}(\bar{p}_2^{(l)}) \mid l = 1, 2, \dots, \#\bar{L}_2(p)\},$$

则二者之间的距离公式为

$$d(\bar{L}_1(p), \bar{L}_2(p)) = \sqrt{\sum_{l=1}^{\#\bar{L}_1(p)} (\frac{\alpha_1^{(l)} + \tau_-}{2\tau} \bar{p}_1^{(l)} - \frac{\alpha_2^{(l)} + \tau_-}{2\tau} \bar{p}_2^{(l)})^2 / \#\bar{L}_1(p)}.$$

2 概率语言环境下考虑专家心理行为的 QFD 方法

针对传统 QFD 方法中存在的问题, 本文提出一种概率语言环境下考虑专家心理行为的 QFD 方法, 该方法主要包括两个阶段: 基于 PL-MAHP 和 FCM 确定顾客需求权重; 基于 PL-TODIM 的工程技术重要度排序. 本文提出的方法为流程图如图 1 所示.

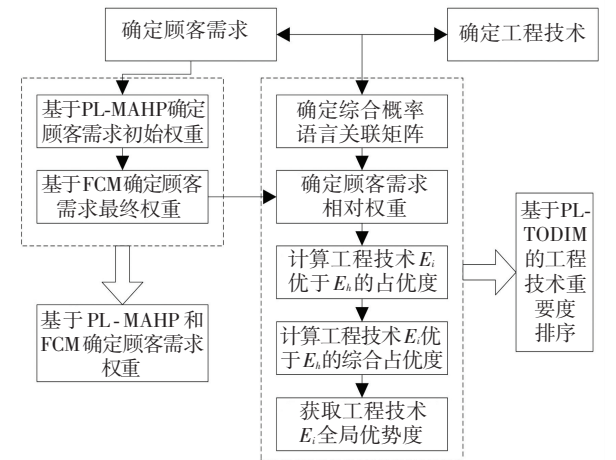


图 1 提出的 QFD 方法的流程图

Fig.1 Framework of the proposed QFD mode

2.1 基于 PL-MAHP 和 FCM 确定顾客需求权重

2.1.1 基于 PL-MAHP 确定顾客需求初始权重

连乘层次分析法 (MAHP) 是一种基于属性成对比较矩阵求取属性主观权重的方法^[19], 相比于 AHP, MAHP 最大的特点是具有传递特性, 不需要对比较矩阵进行一致性检验^[20]. 传统 MAHP 使用精确数值来表示两个属性之间的相对重要性, 导致无法真实准确地反映专家判断信息, 考虑到 PLTS 是表征专家判断的有效工具, 本文引用文献^[17] 提出的 PL-MAHP 方法确定顾客需求初始权重.

步骤 1 确定专家综合概率语言偏好矩阵

设 QFD 专家团队由 Q 位专家 $M_q (q = 1, 2, \dots, Q)$ 组成, 依据专家知识结构和领域经验的不同由 AHP 法确定专家权重向量为 $[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_Q]^T$, 且满足 $\sum_{q=1}^Q \lambda_q = 1$, 对于顾客需求集合 $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, 专家 M_q 给出概率语言偏好矩阵 $D^q = (L_{jk}^q(P))_{n \times n} (j, k = 1, 2, \dots, n)$, 其中 $L_{jk}^q(P) = \{L_{jk}^{q(l)}(P_{jk}^{q(l)}) \mid l = 1, 2, \dots, \#L_{jk}^q(P)\}$ 是基于 $S = \{s_\alpha \mid \alpha = -\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau\}$ 的 PLTS, 表示顾客需求 C_j 对比顾客需求 C_k 的相对重要性, 其满足特性:

$$P_{jk}^{q(l)} = P_{kj}^{q(l)}, L_{jk}^{q(l)} = neg(L_{kj}^{q(l)}),$$
$$L_{jj}^{(q)}(P) = \{s_0(1)\}, \#L_{jk}^q(P) = \#L_{jk}^q(p).$$

通过式 (1)、(2), 聚集 D^q 得到综合概率语言偏好矩阵 $D = (L_{jk}(P))_{n \times n}$.

步骤 2 基于 PL-MAHP 计算顾客需求初始权重

根据 MAHP, 偏好矩阵 $D = (L_{jk}(P))_{n \times n}$ 中 $L_{jk}(P)$ 与顾客需求 C_j 和 C_k 的相对权重关系为 $\tilde{w}_j / \tilde{w}_k = \exp(-\ln \sqrt{2} \times (\sum_{l=1}^{\#L(p)} \alpha^{(l)} p^{(l)} / \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)}))$, 且满足条件 $\prod_{j=1}^n \tilde{w}_j = 1$, 使用对数最小二乘估计得到顾客需求 C_j 权重:

$$\tilde{w}_j = \exp(\frac{\ln \sqrt{2}}{n} \times \sum_{l=1}^n (\sum_{l=1}^{\#L(p)} \alpha^{(l)} p^{(l)} / \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)})), \quad (3)$$

归一化处理得顾客需求 C_j 初始权重

$$w_j^0 = \tilde{w}_j / \sum_{j=1}^n \tilde{w}_j, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

2.1.2 基于 FCM 确定顾客需求最终权重

FCM 是一种常用的属性间因果关联分析方法, 相比于 DEMATEL 和 ANP, FCM 能清晰反映属性间存在正、负因果影响关系, 并通过迭代推理获得属性间动态变化特性^[21]. 考虑到顾客需求间相互影响关系, 本文通过构建模糊认知图表征顾客需求间关联关系, 以 PL-MAHP 得到的顾客需求初始权重作为

FCM 中顾客需求的初始状态值,并根据 FCM 推理机制进行推演分析,最终归一化处理顾客需求稳定状态值确定其最终权重。

步骤 3 确定顾客需求的初始状态值

设顾客需求初始权重作为 FCM 中的顾客需求初始状态值,即 $[A_{C_1}^{t=0}, A_{C_2}^{t=0}, \dots, A_{C_k}^{t=0}, \dots, A_{C_n}^{t=0}] = [w_1^0, w_2^0, \dots, w_k^0, \dots, w_n^0]$, 其中, $A_{C_k}^{t=0}$ 为当迭代次数 $t = 0$ 时,第 k 个顾客需求 C_k 的初始状态值。

步骤 4 确定综合顾客需求自相关矩阵

设专家 M_q 给出顾客需求自相关矩阵为 $W^q = [e_{jk}^q]_{n \times n} (j, k = 1, 2, \dots, n, e_{jk}^q \in [-1, 1])$, 其中 e_{jk}^q 为顾客需求 C_j 对顾客需求 C_k 的影响程度,其正负分别表示顾客需求间存在的正、负影响关系,绝对值的大小反映影响程度大小。通过对 W_q 集聚得到综合顾客需求自相关矩阵 $W = [e_{jk}]_{n \times n}$, 其中,

$$e_{jk} = (\sum_{q=1}^Q \lambda_q e_{jk}^q) / Q. \quad (5)$$

步骤 5 计算顾客需求的稳定状态值

FCM 的推理机制为

$$A_{C_j}^{t+1} = f(A_{C_j}^t + \sum_{k=1, k \neq j}^n e_{jk} \times A_{C_k}^t). \quad (6)$$

式中: $A_{C_j}^t$ 为顾客需求 C_j 迭代次数 t 时的状态值, f 为阈值函数,阈值函数种类多样,其中 sigmoid 函数能够真实反应出各个节点的活动状态趋势及变化程度,并且保证每次的节点迭代状态值输出在 $[0, 1]$, 所以本文选用 sigmoid 函数 $f(x) = 1 / (1 + \exp(-\alpha x))$ 作为阈值函数。

经过一定次数的迭代,节点状态值达到稳定状态或循环状态,甚至混沌状态时则迭代停止^[22]。

步骤 6 确定顾客需求的最终权重

通过对顾客需求稳定状态值归一化处理获得顾客需求的最终权重

$$w_j = A_{C_j} / (\sum_{j=1}^n A_{C_j}), \quad (7)$$

式中: A_{C_j} 为顾客需求 C_j 迭代停止时的稳态状态值。

2.2 基于 PL-TODIM 确定工程技术重要度排序

在建立顾客需求和工程技术的关联关系过程中,专家不同的心理行为将直接影响最终工程技术重要度。以前景理论价值函数为基础提出的 TODIM 方法最主要优点是能够有效地刻画决策者心理行为。因此,本文将 TODIM 拓展到概率语言环境下以确定工程技术重要度,其步骤如步骤 7~11。

步骤 7 确定专家标准综合概率语言关联矩阵

设 $R^q = [L_{ij}^q(p)]_{m \times n}$ 为专家 M_q 提供的概率语言关联矩阵,其中 $L_{ij}^q(p)$ 为专家 M_q 对顾客需求 $C_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 和工程技术 $E_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 间的关联程度评价。根据式(1)、(2)聚集各个专家组概率语

言关联矩阵 $R^q = [L_{ij}^q(p)]_{m \times n}$ 得综合概率语言关联矩阵 $R = [L_{ij}(p)]_{m \times n}$, 基于定义 2 和 3,对 R 进行标准化处理得标准综合概率语言关联矩阵 $\bar{R} = [\bar{L}_{ij}(p)]_{m \times n}$ 。

步骤 8 计算顾客需求的相对权重

令 C_r 为参考顾客需求,顾客需求 C_j 相对权重为

$$w_{jr} = w_j / w_r, j = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

式中: $w_r = \max\{w_j | j = 1, 2, \dots, n\}$ 为 C_r 对应的参照权重。

步骤 9 计算工程技术 E_i 优于 E_h 的占优度

在顾客需求 C_j 下,工程技术 E_i 优于 E_h 的占优度计算表达式为

$$\phi_j(E_i, E_h) = \begin{cases} \sqrt{w_{jr} d(\bar{L}_{ij}(p), \bar{L}_{hj}(p)) / \sum_{j=1}^n w_{jr}}, & \bar{L}_{ij}(p) > \bar{L}_{hj}(p); \\ 0, & \bar{L}_{ij}(p) = \bar{L}_{hj}(p); \\ -\frac{1}{\theta} \sqrt{\sum_{j=1}^n w_{jr} d(\bar{L}_{ij}(p), \bar{L}_{hj}(p)) / w_{jr}}, & \bar{L}_{ij}(p) < \bar{L}_{hj}(p). \end{cases} \quad (9)$$

式中: $d(\bar{L}_{ij}(p), \bar{L}_{hj}(p))$ 是 $\bar{L}_{ij}(p)$ 和 $\bar{L}_{hj}(p)$ 之间距离, $j = 1, 2, \dots, n$; $i, h = 1, 2, \dots, m$ 。参数 $\theta (\theta > 0)$ 表示损失规避系数,需要根据专家的风险偏好调整值的大小,若专家是风险爱好型,则损失影响的程度将扩大,取 $0 < \theta < 1$;若专家是风险规避型,则损失的影响将减小,取 $\theta > 1$;若专家为风险中立型,则为真实损失影响,取 $\theta = 1$ 。

步骤 10 确定工程技术 E_i 优于 E_h 的综合占优度

工程技术 E_i 优于 E_h 的综合占优度为

$$\delta(E_i, E_h) = \sum_{j=1}^n \phi_j(E_i, E_h). \quad (10)$$

步骤 11 获取工程技术 E_i 全局占优度 ξ_i

工程技术 E_i 全局占优度 ξ_i 计算公式为

$$\xi_i = \frac{\sum_{h=1}^m \delta(E_i, E_h) - \min_i (\sum_{h=1}^m \delta(E_i, E_h))}{\max_i \sum_{h=1}^m \delta(E_i, E_h) - \min_i (\sum_{h=1}^m \delta(E_i, E_h))}.$$

根据 ξ_i 对工程技术重要度 E_i 进行排序, ξ_i 值越大,则工程技术 E_i 重要度越高。

3 实例分析

随着全球能源危机和环境污染问题的日趋严重,节能环保的电动汽车的研发已经成为未来汽车产业战略发展方向,某公司为了提升电动汽车产品市场竞争力,选择 3 位专家作为电动汽车产品开发的 QFD 团队,其中包括 1 位产品研发工程师 M_1 、1 位销售经理 M_2 和 1 位制造车间组长 M_3 , 依据专家知识结构和领域经验的不同分别确定专家权重 $\lambda = (0.5, 0.25, 0.25)$ 。QFD 团队通过全面市场调研确

定电动汽车顾客需求: 动力性能好 (C_1), 购买价格低 (C_2), 使用费用低 (C_3), 续航里程长 (C_4). 依据专业知识和实践经验确定电动汽车工程技术指标: 最高车速 (E_1)、最大爬坡度 (E_2)、加速时间 (E_3)、续驶里程 (E_4)、系统成本 (E_5).

$$D = \begin{bmatrix} s_0(1) & s_{-1}(0.45), s_0(0.55) & s_1(0.55), s_2(0.45) & s_{-1}(0.80), s_0(0.20) \\ s_0(0.55), s_1(0.45) & s_0(1) & s_1(0.43), s_2(0.57) & s_{-1}(0.15), s_0(0.85) \\ s_{-2}(0.45), s_{-1}(0.55) & s_{-2}(0.57), s_{-1}(0.43) & s_0(1) & s_{-2}(0.95), s_{-1}(0.05) \\ s_0(0.20), s_1(0.80) & s_0(0.85), s_1(0.15) & s_1(0.05), s_2(0.95) & s_0(1) \end{bmatrix}.$$

步骤 2、3 依据式(3)、(4), 计算得到顾客需求初始权重为 $w_j^0 = (0.246, 0.285, 0.157, 0.311)$, 将顾客需求初始权重设为 FCM 中顾客需求初始状态值 $[A_{C_1}^{t=0}, A_{C_2}^{t=0}, \cdots, A_{C_k}^{t=0}, \cdots, A_{C_n}^{t=0}] = [0.246, 0.285, 0.157, 0.311]$.

步骤 4 通过式(5), 集聚顾客需求自相关矩阵为

$$W = \begin{bmatrix} 0 & -0.575 & 0.250 & 0.625 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.250 & 0 & 0 \\ 0.725 & -0.600 & -0.275 & 0 \end{bmatrix}.$$

步骤 5、6 通过式(6)进行迭代运算, 其中考虑到计算方便与各状态收敛的速度, 取阈值函数中参

3.1 计算过程与结果

步骤 1 3 位专家使用 $S_1 = \{s_{-2}$:不重要, s_{-1} :稍不重要, s_0 :一样重要, s_1 :稍重要, s_2 :重要} 对顾客需求间进行偏好比较, 得到概率语言偏好矩阵 D^q , 并通过式(1)、(2), 聚集 D^q 得到综合概率语言偏好矩阵

数 $\alpha = 1$, 经过 9 次迭代后顾客需求达到稳定状态值 $A_{C_j} = (0.796\ 3, 0.307\ 7, 0.764\ 8, 0.782\ 5)$. 并根据式(7)计算出顾客需求的最终权重为 $w_j = (0.300, 0.116, 0.288, 0.295)$.

步骤 7 3 位专家使用 $S_1 = \{s_{-2}$:低, s_{-1} :稍低, s_0 :中等, s_1 :稍高, s_2 :高} 评价顾客需求和工程技术之间的关联程度, 收集 3 位专家提供的概率语言关联矩阵 $R^q (q = 1, 2, 3)$ 汇总于表 1 中. 通过式(1)、(2) 聚集 R^q 得到综合概率语言关联矩阵 R , 并依据定义 2 和定义 3 标准化处理 R 得到标准综合概率语言关联矩阵 $\bar{R}$, 如表 2 所示.

表 1 3 位专家提供的概率语言关联矩阵
Tab.1 Probabilistic linguistic relationship evaluation matrix provided by 3 experts

M_q	E_i	C_1	C_2	C_3	C_4
M_1	E_1	$\{s_0(0.2), s_1(0.8)\}$	$\{s_0(0.9), s_1(0.1)\}$	$\{s_{-2}(0.2), s_{-1}(0.8)\}$	$\{s_{-1}(0.2), s_0(0.8)\}$
	E_2	$\{s_1(1.0)\}$	$\{s_{-1}(0.2), s_0(0.8)\}$	$\{s_{-2}(0.5), s_{-1}(0.5)\}$	$\{s_{-1}(0.5), s_0(0.5)\}$
	E_3	$\{s_0(0.1), s_1(0.9)\}$	$\{s_0(0.6), s_1(0.4)\}$	$\{s_{-1}(1.0)\}$	$\{s_{-1}(1.0)\}$
	E_4	$\{s_{-1}(0.7), s_0(0.3)\}$	$\{s_0(0.2), s_1(0.8)\}$	$\{s_{-1}(0.8), s_0(0.2)\}$	$\{s_2(1.0)\}$
	E_5	$\{s_0(1.0)\}$	$\{s_1(0.3), s_2(0.7)\}$	$\{s_0(0.5), s_1(0.5)\}$	$\{s_1(0.5), s_2(0.5)\}$
M_2	E_1	$\{s_1(0.5), s_2(0.5)\}$	$\{s_0(0.4), s_1(0.6)\}$	$\{s_{-2}(0.5), s_{-1}(0.5)\}$	$\{s_{-1}(0.5), s_0(0.5)\}$
	E_2	$s_{-1}(0.2), s_0(0.8)\}$	$\{s_0(0.3), s_1(0.7)\}$	$\{s_{-2}(0.8), s_{-1}(0.2)\}$	$\{s_{-1}(0.7), s_0(0.3)\}$
	E_3	$\{s_0(0.8), s_1(0.2)\}$	$\{s_1(0.8), s_2(0.2)\}$	$\{s_{-1}(0.7), s_0(0.3)\}$	$\{s_{-1}(0.8), s_0(0.2)\}$
	E_4	$\{s_0(0.7), s_1(0.3)\}$	$\{s_1(1.0)\}$	$\{s_{-1}(1.0)\}$	$\{s_1(0.2), s_2(0.8)\}$
	E_5	$\{s_0(0.5), s_1(0.5)\}$	$\{s_2(1.0)\}$	$\{s_0(0.3), s_1(0.7)\}$	$\{s_1(0.8), s_2(0.2)\}$
M_3	E_1	$\{s_1(1.0)\}$	$\{s_0(0.5), s_1(0.5)\}$	$\{s_{-2}(0.7), s_{-1}(0.3)\}$	$\{s_{-2}(0.1), s_{-1}(0.9)\}$
	E_2	$\{s_0(0.5), s_1(0.5)\}$	$\{s_{-1}(0.2), s_0(0.8)\}$	$\{s_{-1}(1.0)\}$	$\{s_{-1}(1.0)\}$
	E_3	$\{s_0(0.5), s_1(0.5)\}$	$\{s_1(1.0)\}$	$\{s_{-2}(0.3), s_{-1}(0.7)\}$	$\{s_{-2}(0.5), s_{-1}(0.5)\}$
	E_4	$\{s_{-1}(0.1), s_0(0.9)\}$	$\{s_0(0.2), s_1(0.8)\}$	$\{s_{-2}(0.4), s_{-1}(0.6)\}$	$\{s_1(0.1), s_2(0.9)\}$
	E_5	$\{s_0(0.8), s_1(0.2)\}$	$\{s_1(0.5), s_2(0.5)\}$	$\{s_0(0.8), s_1(0.2)\}$	$\{s_1(0.7), s_2(0.3)\}$

表 2 标准综合概率语言关联矩阵

Tab. 2 Normalized group probabilistic linguistic relationship evaluation matrix

E_i	C_1	C_2	C_3	C_4
E_1	$\{s_0(0.10), s_2(0.12), s_1(0.78)\}$	$\{s_0(0), s_0(0.65), s_1(0.35)\}$	$\{s_{-2}(0), s_{-2}(0.40), s_{-1}(0.60)\}$	$\{s_{-1}(0.45), s_{-2}(0.03), s_0(0.52)\}$
E_2	$\{s_{-1}(0.05), s_0(0.33), s_1(0.62)\}$	$\{s_{-1}(0.15), s_0(0.68), s_1(0.17)\}$	$\{s_{-2}(0), s_{-2}(0.45), s_{-1}(0.55)\}$	$\{s_{-1}(0), s_{-1}(0.68), s_0(0.32)\}$
E_3	$\{s_0(0), s_0(0.38), s_1(0.62)\}$	$\{s_0(0.35), s_2(0.05), s_1(0.60)\}$	$\{s_{-1}(0.85), s_{-2}(0.07), s_0(0.08)\}$	$\{s_{-1}(0.83), s_{-2}(0.12), s_0(0.05)\}$
E_4	$\{s_{-1}(0.18), s_0(0.75), s_1(0.07)\}$	$\{s_0(0), s_0(0.15), s_1(0.85)\}$	$\{s_{-1}(0.83), s_{-2}(0.07), s_0(0.10)\}$	$\{s_1(0), s_1(0.08), s_2(0.92)\}$
E_5	$\{s_0(0), s_0(0.83), s_1(0.17)\}$	$\{s_1(0), s_1(0.28), s_2(0.72)\}$	$\{s_0(0), s_0(0.53), s_1(0.47)\}$	$\{s_1(0), s_1(0.63), s_2(0.37)\}$

步骤 8 选择参照权重 $w_r = 0.300$, 通过式(8)得到相对权重 $w_{jr} = (1.000, 0.386, 0.960, 0.983)$.

步骤 9 通过式(9), 考虑到专家为风险中立型, 取损失规避系数 $\theta = 1$, 计算在顾客需求 $C_j(j = 1, 2, 3, 4)$ 下, 工程技术 E_i 优于 E_h 的占优度 $\phi_j(E_i, E_h)(i, h = 1, 2, 3, 4, 5)$, 进而得到每个顾客需求下的占优度矩阵 $\phi_j(j = 1, 2, 3, 4)$.

$$\phi_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.147 & 0.155 & 0.318 & 0.305 \\ -0.489 & 0 & -0.232 & 0.284 & 0.270 \\ -0.515 & 0.070 & 0 & 0.281 & 0.265 \\ -1.057 & -0.945 & -0.935 & 0 & -0.426 \\ -0.102 & -0.899 & -0.883 & 0.128 & 0 \end{bmatrix},$$
$$\phi_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.096 & -1.368 & -1.497 & -1.541 \\ -0.862 & 0 & -1.497 & -1.686 & -1.741 \\ 0.159 & 0.174 & 0 & -1.132 & -1.341 \\ 0.174 & 0.196 & 0.131 & 0 & -0.886 \\ 0.197 & 0.202 & 0.156 & 0.103 & 0 \end{bmatrix},$$
$$\phi_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0.046 & -0.694 & -0.677 & -0.817 \\ -0.158 & 0 & -0.686 & -0.670 & -0.827 \\ 0.200 & 0.198 & 0 & -0.617 & -0.964 \\ 0.915 & 0.913 & 0.048 & 0 & -0.952 \\ 0.236 & 0.239 & 0.278 & 0.275 & 0 \end{bmatrix},$$
$$\phi_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0.196 & 0.209 & -1.149 & -0.984 \\ -0.665 & 0 & 0.206 & -1.221 & -0.645 \\ -0.707 & -0.696 & 0 & -1.345 & -1.102 \\ 0.339 & 0.360 & 0.397 & 0 & 0.342 \\ 0.290 & 0.190 & 0.325 & -1.160 & 0 \end{bmatrix}.$$

步骤 10 通过式(9)计算工程技术 E_i 优于 E_h 的综合占优度 $\delta(E_i, E_h)$, 从而得到综合占优度矩阵

$$\delta = \begin{bmatrix} 0 & 0.485 & -1.698 & -3.006 & -3.038 \\ -2.138 & 0 & -2.209 & -3.293 & -2.943 \\ -0.863 & -0.255 & 0 & -2.364 & -3.141 \\ -0.349 & -0.196 & -0.359 & 0 & -1.922 \\ -0.310 & -0.268 & -0.124 & -0.654 & 0 \end{bmatrix}$$

步骤 11 通过式(10)获取工程技术 E_i 全局占优势度 $\xi_i: \xi_1 = 0.360, \xi_2 = 0, \xi_3 = 0.429, \xi_4 = 0.841, \xi_5 = 1.000$. 因此, 根据全局占优势度 ξ_i 对工程技术重要度排序为: $E_5 > E_4 > E_3 > E_1 > E_2$.

3.2 损失规避系数的影响

损失规避系数 θ 反映专家对损失的规避心理行为, 文献[23]大量实验研究表明损失规避系数 θ 取值 $[1.0, 2.5]$ 是更为合理的, 为验证系数 θ 对工程技术重要度排序结果的影响, 通过选取 $\theta = 1.0, \theta = 1.5, \theta = 2.0, \theta = 2.5$ 对本案例进行分析, 并计算各工程技术全局占优势度和重要度排序结果, 如表 3 所示.

由表 3 可知, 工程技术 E_5 、 E_4 和 E_2 的重要度排序结果不受损失规避系数 θ 的影响, 一定程度证明该案例运用本文提出的方法得到的排序结果具有一定稳定性. 另外, 随着损失规避系数 θ 的递增, 工程技术 E_3 和 E_1 的排序发生了互换, 意味着专家不同风险态度对工程技术重要度排序结果有重要影响, 因此, 在现实工程技术重要度排序过程中, 需要根据专家对损失的不同规避程度来合理确定适当的 θ 值.

表 3 针对不同系数 θ 的工程技术全局占优度和重要度排序

Tab.3 Overall dominance and importance ranking of ECs with different values of θ

θ	各工程技术全局占优度 ξ_i					重要度排序
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	
$\theta = 1.0$	0.360	0	0.429	0.841	1.000	$E_5 > E_4 > E_3 > E_1 > E_2$
$\theta = 1.5$	0.384	0	0.419	0.847	1.000	$E_5 > E_4 > E_3 > E_1 > E_2$
$\theta = 2.0$	0.405	0	0.411	0.837	1.000	$E_5 > E_4 > E_3 > E_1 > E_2$
$\theta = 2.5$	0.421	0	0.404	0.834	1.000	$E_5 > E_4 > E_1 > E_3 > E_2$

3.3 比较和分析

为验证本文提出的改进 QFD 方法的合理性和有效性,将其与传统 QFD 方法、文献[2]提出的改进 QFD 方法作对比分析,工程技术重要度排序结果如图 2 所示。

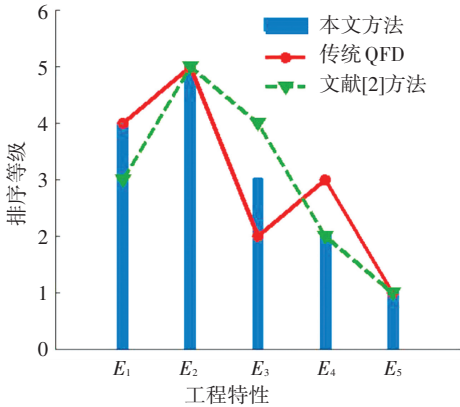


图 2 不同 QFD 方法的工程技术重要度排序比较

Fig.2 Importance ranking of ECs under different QFD methods

由图 2 可知,虽然 3 种方法获得的工程技术重要度排序结果不完全相同,但都将 E₂ 和 E₅ 分别确定为重要度最高和最低的工程技术,一定程度上验证了本文方法的有效性. 与传统 FMEA 方法相比,本文提出的方法重要度排序顺序 E₃ 和 E₄ 发生互换,而与文献[2]方法排序结果对比,则是 E₃ 和 E₁ 的排序产生变化. 导致这些差异可能原因为:

1) 对比传统 QFD 采用清晰的数字和文献[2]的方法采用的 HFLTS 表征顾客需求和工程技术之间的关联程度,本文使用的 PLTS 更能准确真实地反映专家评估信息的模糊性和不确定性,避免信息的丢失;

2) 对比传统 QFD 忽略了顾客需求之间存在的关联关系,文献[2]的方法采用的犹豫模糊 DEMATEL 分析顾客需求间的自相关关系,本文综合 PL-MAHP 和 FCM 确定顾客需求的权重,充分考虑了专家主观经验知识,更真实地描述了顾客需求间存在的正、负影响关系和动态变化.

3) 传统 QFD 和文献[2]分别使用加权平均算法和犹豫模糊 VIKOR 确定工程技术的重要度排序,都是建立在假设专家是完全理性的基础上,忽略了专家心理行为在评估过程中发挥的重要作用,本文采用 PL-TODIM 方法考虑了专家对损失规避的心理行为,使得到的工程技术重要度排序结果更加合理可靠.

4 结 论

1) 本文提出一种概率语言环境下考虑专家心理行为的 QFD 方法. 运用 PLTS 评估顾客需求和工

程技术之间的关联程度,不仅适应了专家的语言表达习惯,而且还能解决专家评估信息丢失的问题,并真实地刻画了专家评估信息的模糊性和不确定性.

2) 从专家主观经验知识和顾客需求间客观关联两方面出发,综合 PL-MAHP 和 FCM 确定顾客需求的相对重要性,更真实的描述了顾客需求间存在的正、负影响关系和动态变化.

3) 基于 PL-TODIM 对工程技术的重要度排序,不仅避免了传统 QFD 中加权平均算法的不合理性,而且考虑了专家对损失规避的心理行为,使得工程技术的重要度排序结果更贴近实际情况.

尽管本文所提的 QFD 方法为产品规划提供了一种有效实用的工具,但仍有一些问题需要在未来研究中加以解决:在实际情况中,工程技术之间彼此存在关联性,因此在未来研究中可以考虑工程技术之间自相关关系对工程技术的重要度排序影响;可以考虑其他 MCDM 方法整合到 QFD 中以获取更准确的工程技术重要度排序;可以引入共识达成过程评估以改善 QFD 团队专家意见分歧问题.

参考文献

[1] KWONG C K, BAI H. Determining the importance weights for the customer requirements in QFD using a fuzzy AHP with an extent analysis approach[J]. IIE Transactions, 2003, 35(7):619. DOI: 10.1080/07408170304355

[2] WU Songman, LIU Huchen, WANG Lien. 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. DOI: 10.1080/00207543.2016.1259670

[3] WANG C H. Incorporating the concept of systematic innovation into quality function deployment for developing multi-functional smart phones[J]. Computers and Industrial Engineering, 2017, 107:367. DOI: 10.1016/j.cie.2016.07.005

[4] BUTTIGIEG S C, DEY P K, CASSAR M R. Combined quality function deployment and logical framework analysis to improve quality of emergency care in Malta[J]. International Journal of Health Care Quality Assurance, 2016, 29(2):123. DOI: 10.1108/IJHC-QA-04-2014-0040

[5] JIA Weiqiang, LIU Zhenyu, LIN Zhiyun, et al. Quantification for the importance degree of engineering characteristics with a multi-level hierarchical structure in QFD[J]. International Journal of Production Research, 2015, 54(6): 1627. DOI: 10.1080/00207543.2015.1041574

[6] YU Liying, WANG Linyu, BAO Yuhang. Technical attributes ratings in fuzzy QFD by integrating interval-valued intuitionistic fuzzy sets and Choquet integral[J]. Soft Computing, 2018, 22(6): 2015. DOI: 10.1007/s00500-016-2464-8

[7] 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. YANG Qiang, LI Yanlai. Analysis method of customer requirements' priority ratings and sensitivity based on intuitionistic fuzzy sets in house of quality[J]. Computer Integrated Manufacturing Sys-

- tems, 2018, 24(4): 978. DOI:10.13196/j.cims.2018.04.017
- [8] 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. DOI: 10.1016/j.cie.2019.04.022
- [9] RODRIGUEZ R, MARTINEZ L, HERRERA F. Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2012, 20(1): 109. DOI: 10.1109/TFUZZ.2011.2170076
- [10] PANG Qi, WANG Hai, XU Zeshui. Probabilisticlinguistic term sets in multi-attribute group decision making [J]. Information Sciences, 2016, 369: 128. DOI: 10.1016/j.ins.2016.06.021
- [11] WU Xingli, LIAO Huchang. An approach to quality function deployment based on probabilistic linguistic term sets and ORESTE method for multi-expert multi-criteria decision making [J]. Information Fusion, 2018, 43: 13. DOI: 10.1016/j.inffus.2017.11.008
- [12] YAZDANI M., CHATTERJEE P, ZAVADSKAS E, et al. Integrated QFD-MCDM framework for green supplier selection[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 3728. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.10.095
- [13] TAVANA M, YAZDANI M, CAPRIO D D. An application of an integrated ANP-QFD framework for sustainable supplier selection[J]. International Journal of Logistics, 2017, 20(3): 254. DOI: 10.1080/13675567.2016.1219702
- [14] HOSSEINI M S M, BEHZADIAN M, IGNATIUS J, et al. Fuzzy PROMETHEE GDSS for technical requirements ranking in HQO [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76(9/10/11/12): 1993. DOI: 10.1007/s00170-014-6233-5
- [15] SONG Wenyan, MING Xinguo, HAN Yi. Prioritising technical attributes in QFD under vague environment: a rough-grey relational analysis approach[J]. International Journal of Production Research, 2014, 52(18): 5528. DOI: 10.1080/00207543.2014.917213
- [16] GOMES L F A M, LIMA M P. TODIM: Basics and application to multicriteria ranking of projects with environmental impacts [J]. Foundations of Computing and Decision Sciences, 1992, 16(4): 113
- [17] WU Xingli, LIAO Huchang, XU Zeshui, et al. Probabilistic linguistic MULTIMOORA: a multi-criteria decision making method based on the probabilistic linguistic expectation function and the improved Borda rule [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(6): 3688. DOI: 10.1109/TFUZZ.2018.2843330
- [18] MAO Xiaobing, WU Min, DONG Jiuying, et al. A new method for probabilistic linguistic multi-attribute group decision making: application to the selection of financial technologies [J]. Applied Soft Computing, 2019, 77: 155. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.01.009
- [19] LOOTSMA F A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART [J]. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 1993, 2(2): 87
- [20] TRIANTAPHYLLOU E. Two new cases of rank reversals when the AHP and some of its additive variants are used that do not occur with the multiplicative AHP [J]. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 2001, 10(1): 11
- [21] BAYKASOGLU A, GOLCUK I. Development of a novel multiple-attribute decision making model via fuzzy cognitive maps and hierarchical fuzzy TOPSIS [J]. Information Sciences, 2015, 301: 75. DOI: 10.1016/j.ins.2014.12.048
- [22] HAJEK P, FROELICH W. Integrating TOPSIS with interval-valued intuitionistic fuzzy cognitive maps for effective group decision making [J]. Information Sciences, 2019, 485: 394. DOI: 10.1016/j.ins.2019.02.035
- [23] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decision under risk [J]. Econometrica, 1979, 47(2): 263

(编辑 杨 波)

(上接第 192 页)

- [9] 杜昆, 李军. 涡轮叶片凹槽状叶顶非定常流动传热特性的数值研究[J]. 推进技术, 2017, 38(3): 551
- DU KUN, LI Jun. Numerical investigations on unsteady leakage flow and heat transfer characteristics of turbine blade with squealer tip [J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(3): 551
- [10] HAN J C, DUTTA S, EKKAD S. Gas turbine heat transfer and cooling technology[M]. second edition.[S.L.]: Taylor and Francis Group, 2013
- [11] BUNKER R S. A review of turbine blade tip heat transfer [C]// Turbine 2000 Symposium on Heat Transfer in Gas Turbine System. Cesme Turkey: [s.n.], 2000
- [12] 周治华, 陈绍文, 李伟航, 等. 叶顶凹槽间隙气膜冷却的传热数值研究[J]. 推进技术, 2018, 39(3): 575
- ZHOU Zhihua, CHEN Shaowen, LEE Weihang, et al. Heat transfer numerical research on film cooling of tip groove clearance [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(3): 575
- [13] WANG Z, ZHANG Q, LIU Y, et al. Impact of cooling injection on the transonic over-tip leakage flow and squealer aerothermal design optimization [J]. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2015, 137(6): 062603
- [14] MA H, ZHANG Q, HE L, et al. Cooling injection effect on a transonic squealer tip: part 2: analysis of aerothermal interaction physics [C]// ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Seoul: ASME, 2016
- [15] ZHOU C, HODSON H, LOCK G. Thermal performance of cooled tips in a high pressure turbine cascade [J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(5): 900
- [16] JIANG Y T, ZHENG Q, DONG P, et al. Conjugate heat transfer analysis of leading edge and downstream mist-air film cooling on turbine vane [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 90: 613
- [17] JUNG E Y, CHUNG H, CHO S M, et al. Conjugate heat transfer on full-coverage film cooling with array jet impingements with various Biot numbers [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 83: 1
- [18] ZHU W, WANG J W, YANG L, et al. Modeling and simulation of the temperature and stress field in a 3D turbine blade coated with thermal barrier coating [J]. Surface and Coating Technology, 2017, 315: 443
- [19] JEONG J, HUSSAIN F. On the identification of a vortex [J]. Fluid Mesh, 1995, 285: 69
- [20] LU X C, JIANG P X, SUGISHIA H, et al. Conjugate heat transfer analysis of film cooling flows [J]. Journal of Thermal Sciecce, 2006, 15(1): 85

(编辑 王小唯)