

基于概率语言和改进 TODIM 的产品服务匹配方法研究

赵敬华^{1†}, 张 艳¹, 林 杰²

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093;
2. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

摘 要: 针对概率语言信息下产品服务模块双边匹配问题, 考虑匹配主体间的相互作用和影响以及决策者的心理行为, 提出了一种基于 BWM(Best-Worst Method), DEMATEL(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) 权重确定方法和改进 TODIM 的概率语言双边匹配方法. 首先, 通过 BWM 方法和概率语言 DEMATEL 方法来确定各匹配模块综合权重; 其次, 通过 TODIM 方法计算产品服务模块的总体优势度, 得到产品服务模块双边匹配满意度矩阵; 在此基础上, 构建以产品和服务效用达到最大的多目标优化模型, 利用线性加权法将其转为单目标模型求解, 进而得到最优匹配方案; 最后, 通过新能源汽车产品服务匹配的案例, 验证论文所提出方法的有效性和可行性, 为新能源汽车产品与服务融合发展提供新方向.

关键词: 概率语言术语集; BWM 方法; DEMATEL; TODIM 方法; 匹配问题; 产品服务方案; 新能源汽车
中图分类号: C934 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.1729

A Two-Sided Matching decision method of Product and Service with Probabilistic Linguistic Term Set and Improved TODIM

ZHAO Jing-hua^{1†}, ZHANG Yan¹, Lin Jie²

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 20092, China)

Abstract: A two-sided matching method with probabilistic linguistic term sets is proposed based on BWM(Best-worst Method), DEMATEL(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory), and TODIM, which is to solve the product service modules matching problem with probabilistic language information considering its interaction and the psychological behavior of decision makers. Firstly, the weight of modules is determined by the BWM method and DEMATEL with probabilistic linguistic term sets. Then, the total dominance degree of product service modules is calculated based on TODIM, obtaining the satisfied matrix. Furthermore, a multi-objective optimization model is constructed to maximize the utility of products and services, which is converted into a single-objective model using the linear weighting method. Finally, an example of the new energy vehicle is provided to prove the effectiveness and feasibility of the proposed method, providing a new direction for the integrated development of new energy vehicle products and services.

Keywords: probabilistic linguistic term sets; BWM method; DEMATEL; TODIM method; two-sided matching; produce service scheme; new energy vehicle

0 引 言

近年来, 随着新能源汽车的发展, 其种类不断增加且性能也不断得到提升. 尽管前景广阔, 但新能源汽车市场推广还有待完善, 且获利空间狭窄. 如何在此情况下, 创造更多价值, 实现产业链升级已成为新能源汽车企业亟待解决的问题^[1]. 而新能源汽车的发展与服务一脉相连, 其市场推广、价值链升级等都离

不开与服务的融合发展^[2]. 对此, 许多学者都进行了研究. 王震坡等^[3] 分析了产业融合背景下新能源汽车技术发展热点, 进而提出了新能源汽车关键技术的发展趋势及方向. 吴艳等^[4] 通过研究发现, 技术融合是新能源汽车与生产服务业融合的关键因素. 武春龙等^[5] 分析了智能产品服务系统模块, 进而对智能汽车服务系统的概念方案进行排序优选. 但这些

收稿日期: 2021-10-09; 录用日期: 2022-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71672128).

[†]通讯作者. E-mail: zhaojinghua@usst.edu.cn.

学者大多研究融合路径、发展趋势、方案选择等方面,较少分析新能源汽车主要零部件产品与服务的匹配耦合机制,向客户提供“产品+服务”的集成方案^[6].随着生活方式的转变,人们对于个性化的需求越来越高.因此,在客户参与下,研究新能源汽车产品与服务双边匹配问题是必不可少的.通过这种方式,不仅可以精炼制造业务,也能提供高效率的服务^[7].

双边匹配问题可以追溯到 1962 年 Gale 和 Shapley^[8] 提出的婚姻配对和大学录取.在这个基础上,Roth^[9] 提出了双边匹配的概念.随着社会的发展,关于双边匹配问题的研究成果不断涌现并应用于不同领域.例如,买卖匹配^[10]、医患匹配^[11]、风险投资企业和风险企业的匹配^[12]、人岗匹配^[13]、供需匹配^[14]等.因此,双边匹配问题在实践中有广泛的背景和社会意义,但已有研究对产品服务匹配问题鲜有涉足.

此外,由于双边匹配复杂的决策背景,决策者无法使用精确的数值进行评估,其决定往往具有模糊性和不确定性.为了解决该问题,很多学者将直觉模糊^[15]、犹豫模糊^[16]、区间犹豫模糊^[17]、区间对偶犹豫模糊^[18]、区间直觉模糊^[19]、三角模糊等^[20]方法引入到双边匹配问题中,并应用于各领域.但在模糊环境下进行评估,决策者所提供的语言术语集的重要性一致,这会造成决策信息的损失.事实上,语言术语集中语言术语的概率不一定相等.因此,Pang 等^[21]提出了概率语言术语集 PLTSs(Probabilistic linguistic term sets),专家评估时可使用不同的语言术语及其不同的概率.PLTSs 不仅可以有效地表达专家的不确定性及偏好信息,而且在处理语言信息时具有灵活性.因此,也有一些学者对概率语言环境下双边匹配问题进行了研究.Li 等^[22]为了解决概率语言信息的匹配问题,提出了一种基于后悔理论的概率语言词集双边匹配决策方法.Li 等^[23]提出了基于概率语言偏好关系的双边匹配方法,定义了时间满意度的概念,并构建了一个模型来处理不同的偏好关系.在文献[24]中,Li 等人基于概率语言,在属性未知的情况下提出了基于前景理论的 PLTSs 双边匹配方法.

综合来看,以上研究为解决产品服务双边匹配问题都提供了比较好的研究思路以及理论方法.但大多数研究将匹配主体当作完全独立的个体,通过评估其属性得到满意度矩阵,并没有考虑各主体之间的相关性,且缺乏在概率语言环境下产品服务双边匹配问题的研究.鉴于此,本文针对概率语言环境下新能源汽车产品服务匹配问题,考虑到产品各模块、服务各模块之间的关联性以及决策者心理行为,

提出了一种基于 BWM 和 DEMATEL 权重确定方法以及基于改进 TODIM 的产品服务双边匹配方法.

1 问题描述

本文考虑在概率语言信息下新能源汽车产品服务模块双边匹配问题.下面给出该匹配问题的具体描述:设所有产品模块组成的集合为 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$, 其中 $P_i (i \in I, I = \{1, 2, \dots, m\})$ 表示第 i 个产品模块,其相应的权重向量为 $W_P = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$, w_i 为第 i 个产品模块的权重, $0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1$. 所有服务模块组成的集合为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, 其中 $S_j (j \in J, J = \{1, 2, \dots, n\})$ 表示第 j 个服务模块,其相应的权重向量为 $W_S = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, w_j 为第 j 个服务模块的权重, $0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^n w_j = 1$. 客户根据自身情况给出基于产品模块对服务模块的概率语言偏好信息 $R = [L_{ij}(p_{ij})]_{m \times n}$, 其中 $L_{ij}(p_{ij})$ 表示基于 P_i 对 S_j 的匹配满意度; $F = [L'_{ij}(p'_{ij})]_{m \times n}$ 是客户给出的基于服务模块对产品模块的概率语言偏好信息,其中 $L'_{ij}(p'_{ij})$ 表示基于 S_j 对 P_i 的匹配满意度.

本文要解决的问题是:根据客户基于产品模块对服务模块的偏好信息和基于服务对产品模块的偏好信息,在考虑模块的关联性以及决策者心理行为的情况下,建立双边匹配模型,获得使企业服务效用及客户满意度尽可能高的“产品+服务”集成方案.

2 预备知识

2.1 概率语言术语集相关概念

定义 1 ^[21] 设 $L = \{l_\alpha | \alpha = 0, 1, \dots, \tau\}$ 是一个语言术语集,则概率语言术语集定义如下:

$$L(p) = \{l^{(k)}(p^{(k)}) | l^{(k)} \in L, k = 1, 2, \dots, \#L(p)\}. \quad (1)$$

其中 $l^{(k)}(p^{(k)})$ 表示语言术语 $l^{(k)}$ 的概率为 $p^{(k)}$, 满足 $p^{(k)} \geq 0, \sum_{k=1}^{\#L(p)} p^{(k)} \leq 1, \#L(p)$ 表示该语言术语集中概率不为 0 的语言术语的个数.

定义 2 ^[25] 给定一个语言术语集 $L = \{l_\alpha | \alpha = 0, 1, \dots, \tau\}$, 概率语言术语集的一个集合为 $\mathfrak{S} = \{L_i(p) | i = 1, 2, \dots, m\}$ 其中 $L_i(p) = \{l_\varepsilon(p_\varepsilon^i) | \varepsilon \in Z_i\}, Z_i \subseteq \mathbb{Z}, \mathbb{Z} = \{0, 1, \dots, \tau\}$. 则标准化概率语言术语集定义如下:

(1) 若 $\sum_{\varepsilon \in Z_i} p_\varepsilon^i < 1$, 则 $L_i(p)$ 标准化公式为:

$$\tilde{L}_i(\tilde{p}) = \{l_\varepsilon(p_\varepsilon^i + \bar{p}^i), l_\kappa(\bar{p}^i) | \varepsilon \in Z_i, \kappa \in (\mathbb{Z} \setminus Z_i)\}. \quad (2)$$

其中 $\bar{p}^i = (1 - \sum_{\varepsilon \in Z_i} p_\varepsilon^i) / (\tau + 1)$.

(2) 若 $\sum_{\varepsilon \in Z_i} p_\varepsilon^i = 1$, 让 $\Lambda = Z_1 \cup Z_2 \cup \dots \cup Z_m, Z_i^c = \Lambda \setminus Z_i$. 如果 $Z_i \subseteq \Lambda (i = 1, 2, \dots, m)$, 则应

该在 $\tilde{L}_i(\tilde{p})$ 中增加语言术语集 $L_i^c = \{l_\kappa \mid \kappa \in Z_i^c\}$ 直到 $Z_i = \Lambda$, 且增加的概率为 0.

定义 3 ^[21] 设 $L = \{l_\alpha \mid \alpha = 0, 1, \dots, \tau\}$, $\tilde{L}_i(p) = \{l_\varepsilon^{(k)}(p_\varepsilon^{(k)}) \mid \varepsilon \in Z_i\}$ 为标准化后的概率语言术语集, $\varepsilon^{(k)}$ 为语言术语 $l^{(k)}$ 下标, 则 $\tilde{L}_i(p)$ 期望函数为:

$$E(\tilde{L}_i(p)) = s_{\bar{\alpha}}. \quad (3)$$

其中 $\bar{\alpha} = \sum_{k=1}^{\#L(p)} \frac{\varepsilon^{(k)}}{\tau} p_\varepsilon^{(k)}, k = 1, 2, \dots, \#L(p)$.

定义 4 ^[21] 设一个标准化后的概率语言术语集为 $\tilde{L}_i(p) = \{l_\varepsilon^{(k)}(p_\varepsilon^{(k)}) \mid \varepsilon \in Z_i\}$, $\varepsilon^{(k)}$ 是语言术语 $l^{(k)}$ 的下标, 则 $\tilde{L}_i(p)$ 的偏差度定义为:

$$\sigma(\tilde{L}_i(p)) = \sqrt{\sum_{k=1}^{\#L(p)} \left(p_\varepsilon^{(k)} (\varepsilon^{(k)} / \tau - \bar{\alpha}) \right)^2}. \quad (4)$$

定义 5 ^[21] 设存在两个概率语言术语集 $L_1(p)$ 和 $L_2(p)$, $\tilde{L}_1(p)$ 和 $\tilde{L}_2(p)$ 分别为其标准化处理后的语言术语集, 则它们的比较法则如下:

- (I) 若 $E(\tilde{L}_1(p)) > E(\tilde{L}_2(p))$, 则 $L_1(p) \succ L_2(p)$.
- (II) 若 $E(\tilde{L}_1(p)) < E(\tilde{L}_2(p))$, 则 $L_1(p) \prec L_2(p)$.
- (III) 若 $E(\tilde{L}_1(p)) = E(\tilde{L}_2(p))$, 则
 - (i) 若 $\sigma(\tilde{L}_1(p)) > \sigma(\tilde{L}_2(p))$, 则 $L_1(p) \prec L_2(p)$.
 - (ii) 若 $\sigma(\tilde{L}_1(p)) = \sigma(\tilde{L}_2(p))$, 则 $L_1(p) \sim L_2(p)$.
 - (iii) 若 $\sigma(\tilde{L}_1(p)) < \sigma(\tilde{L}_2(p))$, 则 $L_1(p) \succ L_2(p)$.

定义 6 ^[25] 假设语言术语集 $L = \{l_\alpha \mid \alpha = 0, 1, \dots, \tau\}$, 有两个经过标准化处理的概率语言术语集, $\tilde{L}_1(p) = \{l_\varepsilon(p_\varepsilon^1) \mid \varepsilon \in Z_1\}$, $\tilde{L}_2(p) = \{l_\varepsilon(p_\varepsilon^2) \mid \varepsilon \in Z_2\}$, 其中 $Z_1 = Z_2 = \Lambda$, 则两个概率术语集之间的欧式距离测度定义如下:

$$d(\tilde{L}_1(p), \tilde{L}_2(p)) = \sqrt{\frac{1}{\#\Lambda} \sum_{\varepsilon \in \Lambda} \left(\frac{\varepsilon \times |p_\varepsilon^1 - p_\varepsilon^2|}{\tau} \right)^2}. \quad (5)$$

其中 $\#\Lambda$ 表示语言术语集 Λ 中所含元素的个数, $\frac{\varepsilon}{\tau}$ 表示语言术语下标为 ε 的语言等级.

2.2 BWM 和 DEMATEL 方法

2.2.1 BWM 权重确定

在确定模块权重时, 由于客户对新能源汽车领域的知识并非十分了解, 往往很难直接给出具体的数值. 为便于客户做出决策, 本文将 BWM 方法用于客户对各模块权重的确定. 使用 BWM 方法, 并不需要客户熟悉该领域的知识, 他们只需依据自身情况, 确定最优和最劣的模块. 然后使用 1 到 9 之间的数字 (表 1 所示) 确定最优模块相对于其他所有模块的偏好, 以及其他所有模块相对于最劣模块的偏好. 最后, 基于偏好信息的一致性建立优化模型, 得到指标的权重. BWM 方法是 Rezaei^[26] 所提出的一种多属性决策方法, 其通过两两比较计算出不同指标的权重, 可有效弥补两两比较产生的不一致性. 此外, 该方法

过程简单、准确而且冗余少, 无需二次比较^[27]. 对于客户来说更易接受, 做出选择. 其求解过程如下:

step 1: 确定模块集 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_n\}$, 并在 M 中选取最优模块 M_B 与最劣模块 M_W .

step 2: 利用 1-9 衡量最优模块 M_B 相比于其他模块 M_i 的重要程度, 构建比较向量 $A_B = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn})$. 其中 a_{Bi} 表示最优模块 M_B 相比其他模块 M_i 的重要程度.

step 3: 利用 1-9 衡量其他模块 M_i 相比于最劣模块 M_W 的重要程度, 构建比较向量 $A_W = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})$. 其中 a_{iW} 表示其他模块 M_i 相比最优模块 M_B 的重要程度.

step 4: 构建数学规划模型, 利用 LINGO 求解, 进而得到最优模块权重 $\bar{w}^* = (\bar{w}_1^*, \bar{w}_2^*, \dots, \bar{w}_n^*)^T$.

$\min \xi.$

s.t. $\left| \frac{\bar{w}_B}{\bar{w}_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \text{ for all } j;$

$\left| \frac{\bar{w}_j}{\bar{w}_W} - a_{jW} \right| \leq \xi, \text{ for all } j;$

$\sum_{j=1}^n \bar{w}_j = 1; \bar{w}_j \geq 0, \text{ for all } j. \quad (6)$

表 1 比较向量标度的含义

标度	具体说明
1	表示模块 M_i 与 M_j 相比, 同等重要
3	表示模块 M_i 与 M_j 相比, 稍微重要
5	表示模块 M_i 与 M_j 相比, 明显重要
7	表示模块 M_i 与 M_j 相比, 非常重要
9	表示模块 M_i 与 M_j 相比, 极端重要
2,4,6,8	以上相邻判断的中间值

2.2.2 基于概率语言 DEMATEL 权重确定方法

使用 BWM 方法计算模块权重过程简单、准确且冗余少, 但客户通常对新能源汽车各模块的认识并不深刻, 其评价具有片面性. 从实际出发, 新能源汽车产品服务模块间存在关联性. 譬如, 从产品模块看: BMS(Battery Management System) 模块对于电池的监控, 可对其进行保护, 延长电池使用寿命, 而 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 则是电机中的主要零部件; 从服务模块看: 新能源汽车在维修时, 需要给零部件提供备件; 或对于新能源汽车的保养, 若提供一些知识服务, 能更好了解汽车的养护. 在使用中就维护车辆, 保证动力电池的使用, 延长车辆的寿命. 因此, 本节将 DEMATEL 方法引入到模块权重的确定, 利用专家的经验知识来处理复杂的系统问题, 用定量、简明扼要的方式表示各属性间的相互影响的作用^[28]. 其主要步骤如下:

step 1: 决策者利用概率语言术语对模块集 $M =$

$\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ 进行两两比较, 给出模块间的直接关系矩阵 $Z = [z_{ij}]_{m \times m}$. 其中 z_{ij} 表示模块 M_i 对 M_j 的影响程度. 特别地, 元素 z_{ii} 均用 $l_0(1)$ 表示.

step 2: 计算标准化的直接关系矩阵 $\bar{Z} = [\bar{z}_{ij}]_{m \times m}$. 将直接关系矩阵通过函数转化为精确值, 得到精确值关联表.

$$\bar{z}_{ij} = \frac{I(z_{ij})}{\max \left(\sum_{j=1}^m z_{ij} \right)}. \quad (7)$$

其中 $I(z_{ij}) = E(z_{ij}) - \sigma(z_{ij})$, $E(z_{ij})$ 为语言术语集 z_{ij} 的期望值, $\sigma(z_{ij})$ 是其偏差度.

step 3: 先得到综合关系矩阵 T , 再根据矩阵 T 计算各模块的总体影响度与被影响度.

$$T = \bar{Z} (E - \bar{Z})^{-1}. \quad (8)$$

其中 E 为单位矩阵. 将综合关系矩阵 T 分别按行、按列相加得到模块的影响度 ($SR_i = \sum_{j=1}^m t_{ij}$) 与被影响度 ($SC_j = \sum_{i=1}^m t_{ij}$). SR_i 值越大, 表明 M_i 模块对其他模块的影响越大; SC_j 越大, 表明 M_j 模块被其他模块所影响的程度越大.

step 4: 计算各模块的重要度 W_i .

$$W_i = \sqrt{(SR_i + SC_j)^2 + (SR_i - SC_j)^2}. \quad (9)$$

其中, $SR_i + SC_j (i = j)$ 表示中心度, 体现模块的重要程度, $SR_i - SC_j (i = j)$ 表示原因度, 体现一个模块与其他模块的关系程度.

step 5: 计算对各模块的权重. 根据 step 4 中所求 W_i 进行归一化处理, 得到各模块的权重为:

$$\hat{w}_i = W_i / \sum_{i=1}^m W_i. \quad (10)$$

式中, $\hat{w}_i \in (0, 1)$ 并满足 $\sum_{i=1}^m \hat{w}_i = 1$.

2.2.3 各模块综合权重

考虑到客户的自身情况以及专家对各模块之间相互作用的深入分析, 将二者所求模块权重进行综合, 使得模块的权重更加合理. 假设 $\bar{w}$ 为基于 BWM 方法求得的模块权重, $\hat{w}$ 为基于 DEMATEL 方法求得的模块权重, 则模块的综合权重值计算如下:

$$w = \zeta \hat{w} + (1 - \zeta) \bar{w}. \quad (11)$$

其中, $\zeta \in [0, 1]$ 为权重偏好系数, $\zeta = 0$ 时, 表示不关注模块间的关联性, 只考虑 BWM 求得的模块权重. 随着 ζ 值的增大, 表明决策者越关注模块间相互作用.

2.3 TODIM 方法

TODIM 方法可以反映决策者的心理行为, 其核心是计算每个方案与其它方案之间的优势度; 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^[25]. 为解决新能源汽车主

要零部件产品与服务的双边匹配的问题, 本文将概率语言术语与改进 TODIM 方法相结合, 得到双边匹配满意度矩阵, 进而构建了基于概率语言和 TODIM 产品服务模块的双边匹配模型. 具体步骤如下:

step 1: 基于产品模块 P_i , 将服务模块中的 S_j 与 S_k 进行比较时所获得的收益与损失值 d_{jk}^i .

$$d_{jk}^i = \begin{cases} d(L_{ij}(p_{ij}), L_{ik}(p_{ik})), L_{ij}(p_{ij}) \succ L_{ik}(p_{ik}) \\ 0, L_{ij}(p_{ij}) \sim L_{ik}(p_{ik}) \\ -d(L_{ij}(p_{ij}), L_{ik}(p_{ik})), L_{ij}(p_{ij}) \prec L_{ik}(p_{ik}). \end{cases} \quad (12)$$

其中 $d(L_{ij}(p_{ij}), L_{ik}(p_{ik}))$ 表示 $L_{ij}(p_{ij})$ 和 $L_{ik}(p_{ik})$ 之间的距离测度. 如果 $L_{ij}(p_{ij}) \succ L_{ik}(p_{ik})$, d_{jk}^i 表示收益, 若 $L_{ij}(p_{ij}) \prec L_{ik}(p_{ik})$, d_{jk}^i 表示损失.

step 2: 在产品 P_i 下, 求服务模块 S_j 相对于服务模块 S_k 的优势度 ϕ_{jk}^i .

$$\phi_{jk}^i = \begin{cases} \sqrt{\frac{\omega_{i\eta} d_{jk}^i}{\sum_{i=1}^m \omega_{i\eta}}}, & L_{ij}(p_{ij}) \succ L_{ik}(p_{ik}) \\ 0, & L_{ij}(p_{ij}) \sim L_{ik}(p_{ik}) \\ -\frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{-d_{jk}^i \sum_{i=1}^m \omega_{i\eta}}{\omega_{i\eta}}}, & L_{ij}(p_{ij}) \prec L_{ik}(p_{ik}). \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\phi_{jk}^i = \phi_{P_i}(S_j, S_k)$, $\omega_{i\eta}$ 表示 P_i 相对于 P_η 的相对权重, 即 $\omega_{i\eta} = \frac{\omega_i}{\omega_\eta}$, $w_i = \zeta \hat{w}_i + (1 - \zeta) \bar{w}_i$, $\omega_\eta = \max\{\omega_i | i = 1, 2, \dots, m\}$, θ 表示决策者面对损失时的风险因子, 满足 $\theta > 0$. 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.

step 3: 得到基于产品模块 P_i , 对服务模块 S_j 的匹配满意度 α_{ij} .

$$\alpha_{ij} = \frac{\varphi_{ij}^S - \min_{i \in I, j \in J} \{\varphi_{ij}^S\}}{\max_{i \in I, j \in J} \{\varphi_{ij}^S\} - \min_{i \in I, j \in J} \{\varphi_{ij}^S\}}. \quad (14)$$

其中 $i \in I, j \in J$, $\varphi_{ij}^S = \sum_{k=1}^n \phi_{jk}^i$ 表示基于 P_i, S_j 相对于其他服务模块的总体优势度. 且 $\alpha_{ij} \in [0, 1]$, 其值越大, 表明针对 P_i , 决策者对 S_j 的满意度更大.

step 4: 同样地, 求基于服务模块 S_j , 将产品模块中的 P_i 与 P_l 进行比较时所获得的收益与损失值 d_{il}^j .

$$d_{il}^j = \begin{cases} d(L_{ji}(p_{ji}), L_{jl}(p_{jl})), L_{ji}(p_{ji}) \succ L_{jl}(p_{jl}) \\ 0, L_{ji}(p_{ji}) \sim L_{jl}(p_{jl}) \\ -d(L_{ji}(p_{ji}), L_{jl}(p_{jl})), L_{ji}(p_{ji}) \prec L_{jl}(p_{jl}). \end{cases} \quad (15)$$

其中 $d(L_{ji}(p_{ji}), L_{jl}(p_{jl}))$ 表示 $L_{ji}(p_{ji})$ 和 $L_{jl}(p_{jl})$ 之间的距离测度. 如果 $L_{ji}(p_{ji}) \succ L_{jl}(p_{jl})$, d_{il}^j 表示收益, 若 $L_{ji}(p_{ji}) \prec L_{jl}(p_{jl})$, d_{il}^j 表示损失.

step 5: 在服务模块 S_j 下, 求产品模块 P_i 相对于

产品模块 P_l 的优势度 ϕ_{il}^j .

$$\phi_{il}^j = \begin{cases} \sqrt{\frac{\omega_{jr} d_{il}^j}{\sum_{j=1}^n \omega_{jr}}} & , L_{ji}(p_{ji}) \succ L_{jl}(p_{jl}) \\ 0 & , L_{ji}(p_{ji}) \sim L_{jl}(p_{jl}) \\ -\frac{1}{\theta} \sqrt{\frac{-d_{il}^j \sum_{j=1}^n \omega_{jr}}{\omega_{jr}}} & , L_{ji}(p_{ji}) \prec L_{jl}(p_{jl}) \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\phi_{il}^j = \phi_{S_j}(P_i, P_l)$, ω_{jr} 表示 S_j 相对于 S_r 的相对权重, 即 $\omega_{jr} = \frac{\omega_j}{\omega_r}$, $\omega_j = \zeta \hat{\omega}_j + (1 - \zeta) \bar{\omega}_j$, $\omega_r = \max\{\omega_j | j = 1, 2, \dots, n\}$. θ 表示决策者面对损失时的风险因子, 满足 $\theta > 0$. 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.

step 6: 得到基于服务模块 S_j 对产品模块 P_i 的匹配满意度 β_{ij} .

$$\beta_{ij} = \frac{\varphi_{ij}^P - \min_{i \in I, j \in J} \{\varphi_{ij}^P\}}{\max_{i \in I, j \in J} \{\varphi_{ij}^P\} - \min_{i \in I, j \in J} \{\varphi_{ij}^P\}} \quad (17)$$

其中 $i \in I, j \in J$, $\varphi_{ij}^P = \sum_{l=1}^n \phi_{il}^j$ 表示基于 S_j, P_i 相对于其他产品模块的总体优势度. 且 $\beta_{ij} \in [0, 1]$, 其值越大, 表明针对 S_j , 决策者对 P_i 的满意度更大.

3 概率语言双边匹配决策方法

根据决策者基于产品 P_i 对服务 S_j 的匹配满意度 α_{ij} 、基于服务 S_j 对产品 P_i 的匹配满意 β_{ij} , 建立多目标规划模型, 以致产品和服务效用最大化, 也使得企业效益和客户满意度最大化. 因而, 构建的产品与服务匹配决策模型^[16,22,24] 如下所示:

$$\begin{aligned} \max Z_S &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_{ij}, \\ \max Z_P &= \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_{ij}, \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^m x_{ij} &\leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} &\leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ x_{ij} &\in \{0, 1\}, i \in I, j \in J. \end{aligned} \quad (18)$$

其中, Z_P 、 Z_S 分别表示产品和服务的效用, 约束条件则分别表示产品模块 P_i 至多与一个服务模块 S_j 匹配, 服务模块 S_j 至多与一个产品模块 P_i 匹配, x_{ij} 为 0-1 变量. 通过考虑产品与服务的权重, 论文利用线性加权将双目标优化模型转为单目标进行求解. k_1, k_2 分别表示服务和产品的权重, 客户可以根据自己实际情况来确定其值. 因此, 转化为单目标模型为:

$$\begin{aligned} \max Z &= k_1 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} x_{ij} + k_2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_{ij}, \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^m x_{ij} &\leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, n, \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} &\leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ x_{ij} &\in \{0, 1\}, i \in I, j \in J. \end{aligned} \quad (19)$$

由于以上模型的约束条件和目标函数均为线性, 因此, 论文直接利用 MATLAB 进行求解.

基于以上分析, 产品服务双边匹配的步骤如下:

step 1: 根据给出的基础信息, 得到决策者基于产品模块对服务模块的偏好信息、基于服务模块对产品模块的偏好信息, 然后根据定义 2 将其标准化.

step 2: 利用 BWM 方法得到各产品、服务模块的权重 $\bar{w}_p, \bar{w}_s$.

step 3: 利用概率语言 DEMATEL 方法得到各产品、服务模块权重 $\hat{w}_p, \hat{w}_s$.

step 4: 利用公式 (11) 得到产品模块、服务模块的综合权重 w_p, w_s .

step 5: 利用公式 (12)-(14) 计算服务模块 S_j 的总体优势度 φ_{ij}^S , 继而得到基于产品模块对服务模块的匹配满意度 α_{ij} .

step 6: 利用公式 (15)-(17) 计算产品模块 P_i 的总体优势度 φ_{ij}^P , 继而得到基于服务模块对产品模块的匹配满意度 β_{ij} .

step 7: 构建双边匹配优化模型 (18)、(19), 求解模型, 继而得到产品服务方案.

4 算例分析

假设某个进行服务化转型的新能源汽车公司为了给客户提供个性化产品服务方案, 需要实施模块化新能源汽车服务设计. 希望以此来降低服务成本, 提升效率, 满足客户多元化、个性化的需求. 通过调查不同客户需求, 新能源汽车主要产品零部件模块集合为 $P = \{P_1 : \text{电池模块}, P_2 : \text{电机模块}, P_3 : \text{电控模块}, P_4 : \text{IGBT 模块}, P_5 : \text{OBC(On-board Charger) 模块}, P_6 : \text{BMS 模块}\}$; 主要服务模块集合 $S = \{S_1 : \text{知识服务}, S_2 : \text{维修模块}, S_3 : \text{保养模块}, S_4 : \text{备件提供}, S_5 : \text{在线诊断}, S_6 : \text{回收利用}\}$. 利用语言术语集 $L_1 = \{l_0 : \text{非常不满意/不重要}, l_1 : \text{不满意/不重要}, l_2 : \text{一般}, l_3 : \text{满意/重要}, l_4 : \text{非常满意/重要}\}$, 客户分别给出基于产品模块对服务模块的偏好信息、基于服务模块对产品模块的偏好信息. 其评价矩阵如表 2 所示, 再利用定义 2 对评估矩阵进行标准化.

4.1 基于 BWM 方法的模块权重

step 1: 在产品模块中, 选取最优产品模块 P_1 和最劣产品模块 P_5 .

step 2: 利用表 1 的 1-9 衡量最优产品模块 P_1 相比于所有产品模块的重要程度, 构建比较向量 $P_B = [1, 3, 4, 7, 9, 5]$; 同时确定其他所有产品模块 P_i 相比于最劣产品模块 P_5 的重要程度, 构建比较向量

$P_W = [9, 6, 7, 5, 1, 6]$.

step 3: 通过模型 (6) 构建权重求解模型, 然后用 LINGO 求解. 求得产品模块最优权重为: $\bar{w}_p = [0.5155, 0.1353, 0.123, 0.0833, 0.0199, 0.123]^T$.

step 4: 重复以上步骤, 得到最优服务模块 S_2 , 最劣服务模块 S_1 , 构建比较向量 $S_B = [9, 1, 3, 6, 5, 4]$, $S_W = [1, 9, 6, 7, 5, 3]$. 通过数学模型 (6), 用 LINGO 求解得到服务模块最优权重为: $\bar{w}_s = [0.0209, 0.5179, 0.1159, 0.1151, 0.136, 0.0942]^T$.

4.2 基于 DEMATEL 的产品服务模块权重

为表示模块之间的相互影响关系, 选用的语言术语集为 $L_2 = \{l_0 : \text{无影响}, l_1 : \text{影响程度小}, l_2 : \text{影响程度适中}, l_3 : \text{影响程度高}, l_4 : \text{影响程度极高}\}$. 决策者根据自身的知识和经验, 分别给出产品模块、服务模块的概率语言直接关系矩阵. 如表 3 所示.

根据式子 (7), 求得直接影响矩阵 Z^P, Z^S . 然后通过式子 (8) 分别求得产品、服务模块得综合关系矩阵 T^P, T^S . 结果如下:

$$T^P = \begin{bmatrix} 0.575 & 0.650 & 0.522 & 0.517 & 0.421 & 0.496 \\ 0.682 & 0.449 & 0.550 & 0.428 & 0.497 & 0.355 \\ 0.623 & 0.594 & 0.392 & 0.419 & 0.441 & 0.459 \\ 0.936 & 0.869 & 0.707 & 0.461 & 0.643 & 0.530 \\ 0.783 & 0.564 & 0.527 & 0.440 & 0.361 & 0.452 \\ 0.992 & 0.744 & 0.687 & 0.544 & 0.677 & 0.452 \end{bmatrix}$$

$$T^S = \begin{bmatrix} 0.223 & 0.369 & 0.387 & 0.184 & 0.371 & 0.094 \\ 0.431 & 0.512 & 0.598 & 0.501 & 0.516 & 0.327 \\ 0.629 & 0.802 & 0.491 & 0.505 & 0.614 & 0.236 \\ 0.388 & 0.733 & 0.613 & 0.317 & 0.435 & 0.263 \\ 0.456 & 0.589 & 0.458 & 0.332 & 0.305 & 0.145 \\ 0.047 & 0.142 & 0.059 & 0.048 & 0.049 & 0.031 \end{bmatrix}$$

表 2 概率语言信息评价矩阵

		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
基于产品模块对服务模块偏好信息	P_1	$\{l_2(0.2), l_3(0.4), l_4(0.3)\}$	$\{l_3(0.2), l_4(0.7)\}$	$\{l_3(0.3), l_4(0.5)\}$	$\{l_1(0.1), l_2(0.6), l_3(0.1)\}$	$\{l_3(0.3), l_4(0.4)\}$	$\{l_3(0.3), l_4(0.6)\}$
	P_2	$\{l_1(0.6), l_2(0.2), l_3(0.1)\}$	$\{l_2(0.6), l_3(0.2)\}$	$\{l_2(0.2), l_3(0.6), l_4(0.1)\}$	$\{l_2(0.1), l_3(0.7), l_4(0.1)\}$	$\{l_2(0.4), l_3(0.6)\}$	$\{l_2(0.2), l_3(0.2), l_4(0.5)\}$
	P_3	$\{l_1(0.1), l_2(0.7), l_3(0.2)\}$	$\{l_2(0.1), l_3(0.5), l_4(0.2)\}$	$\{l_0(0.1), l_1(0.2), l_2(0.6)\}$	$\{l_2(0.6), l_3(0.3)\}$	$\{l_2(0.1), l_3(0.8)\}$	$\{l_1(0.7), l_2(0.2)\}$
	P_4	$\{l_1(0.1), l_2(0.7), l_3(0.2)\}$	$\{l_1(0.4), l_2(0.5)\}$	$\{l_1(0.7), l_2(0.2)\}$	$\{l_0(0.2), l_1(0.6), l_2(0.1)\}$	$\{l_2(0.6), l_3(0.2)\}$	$\{l_0(0.5), l_1(0.4)\}$
	P_5	$\{l_1(0.3), l_2(0.6)\}$	$\{l_2(0.3), l_3(0.6)\}$	$\{l_1(0.4), l_2(0.6)\}$	$\{l_3(0.3), l_4(0.6)\}$	$\{l_3(0.2), l_4(0.7)\}$	$\{l_1(0.6), l_2(0.3)\}$
	P_6	$\{l_3(0.2), l_4(0.75)\}$	$\{l_1(0.3), l_2(0.4)\}$	$\{l_1(0.4), l_2(0.5)\}$	$\{l_2(0.25), l_3(0.6)\}$	$\{l_3(0.2), l_4(0.8)\}$	$\{l_0(0.15), l_1(0.6), l_2(0.1)\}$
基于服务模块对产品模块偏好信息	P_1	$\{l_2(0.15), l_3(0.2), l_4(0.36)\}$	$\{l_3(0.3), l_4(0.6)\}$	$\{l_2(0.15), l_3(0.25), l_4(0.55)\}$	$\{l_1(0.14), l_2(0.4), l_3(0.2)\}$	$\{l_3(0.2), l_4(0.7)\}$	$\{l_3(0.2), l_4(0.8)\}$
	P_2	$\{l_2(0.4), l_3(0.55)\}$	$\{l_2(0.5), l_3(0.25), l_4(0.25)\}$	$\{l_2(0.15), l_3(0.7), l_4(0.1)\}$	$\{l_2(0.3), l_3(0.55), l_4(0.1)\}$	$\{l_2(0.2), l_3(0.5), l_4(0.3)\}$	$\{l_2(0.1), l_3(0.2), l_4(0.65)\}$
	P_3	$\{l_1(0.35), l_2(0.55), l_3(0.1)\}$	$\{l_2(0.35), l_3(0.4), l_4(0.15)\}$	$\{l_0(0.1), l_1(0.35), l_2(0.45)\}$	$\{l_1(0.25), l_2(0.6), l_3(0.15)\}$	$\{l_2(0.1), l_3(0.7), l_4(0.15)\}$	$\{l_0(0.5), l_1(0.4), l_2(0.1)\}$
	P_4	$\{l_0(0.4), l_1(0.55)\}$	$\{l_0(0.6), l_1(0.3), l_2(0.1)\}$	$\{l_1(0.7), l_2(0.2)\}$	$\{l_0(0.2), l_1(0.45), l_2(0.3)\}$	$\{l_2(0.4), l_3(0.4)\}$	$\{l_0(0.3), l_1(0.4), l_2(0.2)\}$
	P_5	$\{l_0(0.6), l_1(0.4)\}$	$\{l_1(0.5), l_2(0.4)\}$	$\{l_0(0.3), l_1(0.4), l_2(0.3)\}$	$\{l_3(0.3), l_4(0.7)\}$	$\{l_2(0.3), l_3(0.15), l_4(0.2)\}$	$\{l_0(0.4), l_1(0.3), l_2(0.2)\}$
	P_6	$\{l_3(0.35), l_4(0.55)\}$	$\{l_0(0.25), l_1(0.35), l_2(0.2)\}$	$\{l_1(0.35), l_2(0.45)\}$	$\{l_1(0.2), l_2(0.25), l_3(0.45)\}$	$\{l_3(0.1), l_4(0.9)\}$	$\{l_0(0.1), l_1(0.5), l_2(0.2)\}$

表 3 模块直接关联矩阵

		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6
产品模块关联矩阵	P_1	$\{l_0(1)\}$	$\{l_2(0.8), l_3(0.2)\}$	$\{l_1(0.6), l_2(0.3)\}$	$\{l_2(0.6), l_3(0.4)\}$	$\{l_0(0.4), l_1(0.6)\}$	$\{l_2(0.8), l_3(0.2)\}$
	P_2	$\{l_2(1)\}$	$\{l_0(1)\}$	$\{l_2(0.6), l_3(0.3)\}$	$\{l_1(0.5), l_2(0.5)\}$	$\{l_2(0.9)\}$	$\{l_0(0.4), l_1(0.6)\}$
	P_3	$\{l_1(0.6), l_2(0.3)\}$	$\{l_2(0.8)\}$	$\{l_0(1)\}$	$\{l_1(0.5), l_2(0.5)\}$	$\{l_1(0.8)\}$	$\{l_2(0.7)\}$
	P_4	$\{l_3(0.8)\}$	$\{l_3(0.3), l_4(0.6)\}$	$\{l_2(0.7), l_3(0.2)\}$	$\{l_0(1)\}$	$\{l_2(0.9)\}$	$\{l_1(0.7), l_2(0.3)\}$
	P_5	$\{l_3(0.6), l_4(0.3)\}$	$\{l_1(0.7), l_2(0.3)\}$	$\{l_1(0.3), l_2(0.7)\}$	$\{l_1(0.7), l_2(0.3)\}$	$\{l_0(1)\}$	$\{l_1(0.4), l_2(0.6)\}$
	P_6	$\{l_3(0.3), l_4(0.7)\}$	$\{l_1(0.2), l_2(0.7)\}$	$\{l_2(0.8)\}$	$\{l_1(0.9), l_2(0.1)\}$	$\{l_2(0.1), l_3(0.8)\}$	$\{l_0(1)\}$
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
服务模块关联矩阵	S_1	$\{l_0(1)\}$	$\{l_1(0.8), l_2(0.2)\}$	$\{l_2(0.6), l_3(0.2)\}$	$\{l_0(0.8), l_1(0.2)\}$	$\{l_2(0.8)\}$	$\{l_0(0.7), l_1(0.3)\}$
	S_2	$\{l_1(0.5), l_2(0.5)\}$	$\{l_0(1)\}$	$\{l_2(0.2), l_3(0.7)\}$	$\{l_3(0.8)\}$	$\{l_2(0.7), l_3(0.3)\}$	$\{l_2(0.9)\}$
	S_3	$\{l_3(0.5), l_4(0.5)\}$	$\{l_4(0.8)\}$	$\{l_0(1)\}$	$\{l_2(1)\}$	$\{l_3(0.7)\}$	$\{l_0(0.3), l_1(0.7)\}$
	S_4	$\{l_0(0.7), l_1(0.3)\}$	$\{l_3(0.3), l_4(0.7)\}$	$\{l_3(0.7), l_4(0.2)\}$	$\{l_0(1)\}$	$\{l_1(0.9)\}$	$\{l_1(0.9), l_2(0.1)\}$
	S_5	$\{l_2(0.4), l_3(0.6)\}$	$\{l_3(0.8)\}$	$\{l_1(0.3), l_2(0.7)\}$	$\{l_1(0.8), l_2(0.2)\}$	$\{l_0(1)\}$	$\{l_0(0.8), l_1(0.2)\}$
	S_6	$\{l_0(0.6), l_1(0.4)\}$	$\{l_1(0.7), l_2(0.2)\}$	$\{l_0(0.8)\}$	$\{l_0(0.7), l_1(0.3)\}$	$\{l_0(0.9)\}$	$\{l_0(1)\}$

基于综合关系矩阵, 可以求得各模块的影响度与被影响度. 基于此, 求各模块的重要度并将其归一化. 故, 基于 DEMATEL 产品模块的权重为 $\hat{w}_p = [0.1911, 0.1667, 0.1531, 0.1713, 0.1492, 0.1687]^T$, 基于 DEMATEL 服务模块的权重为 $\hat{w}_s = [0.1421, 0.2268, 0.2225, 0.1749, 0.1722, 0.0615]^T$.

4.3 TODIM 产品服务模块匹配方法

Kahneman 等^[29] 通过研究表明, 当 $\theta = 2.25$ 时, 更加符合大部分决策者面对损失时的心理行为. 故本文选取 $\theta = 2.25$ 表示客户对待损失时的真实值.

设权重调节系数 $\zeta = 0.5$.

通过式子 (12)-(14) 计算服务模块 S_j 的总体优势度矩阵 φ_{ij}^S , 得到基于产品模块对服务模块的匹配满意度矩阵:

$$\alpha_{ij} = \begin{bmatrix} 0.555 & 1.000 & 0.798 & 0.303 & 0.705 & 0.889 \\ 0.178 & 0.327 & 0.662 & 0.737 & 0.529 & 0.958 \\ 0.478 & 0.924 & 0.333 & 0.587 & 0.811 & 0.170 \\ 0.813 & 0.649 & 0.481 & 0.401 & 0.874 & 0.297 \\ 0.202 & 0.438 & 0.143 & 0.806 & 0.912 & 0.000 \\ 0.910 & 0.350 & 0.278 & 0.537 & 0.963 & 0.148 \end{bmatrix}.$$

通过式子 (15)-(17) 计算产品模块 P_i 的总体优势度矩阵 φ_{ij}^P , 得到基于服务模块对产品模块的匹配满意度矩阵:

$$\beta_{ij} = \begin{bmatrix} 0.676 & 1.000 & 0.892 & 0.406 & 0.763 & 0.824 \\ 0.411 & 0.782 & 0.722 & 0.644 & 0.497 & 0.705 \\ 0.230 & 0.705 & 0.439 & 0.284 & 0.364 & 0.070 \\ 0.057 & 0.369 & 0.318 & 0.151 & 0.098 & 0.235 \\ 0.000 & 0.516 & 0.276 & 0.896 & 0.260 & 0.183 \\ 0.813 & 0.451 & 0.480 & 0.546 & 0.890 & 0.300 \end{bmatrix}.$$

最后, 根据模型 (18)、(19) 建立双边匹配优化模型. 为不失一般性, 取 $k_1 = k_2 = 0.5$, 利用 MATLAB 求解. 求得 $x_{13} = x_{26} = x_{32} = x_{41} = x_{54} = x_{65} = 1$. 即, 最优产品服务方案为: 产品模块 P_1 与服务模块 S_3 匹配, P_2 与 S_6 匹配, P_3 与 S_2 匹配, P_4 与 S_1 匹配, P_5 与 S_4 匹配, P_6 与 S_5 匹配.

4.4 敏感性分析

4.4.1 不同参数 θ 的影响分析

TODIM 方法中的损失规避系数 θ 可以反映出决策者的心理行为. 因此本节对参数 θ 在概率语言 TODIM 方法下进行敏感性分析. 研究当 $k_1 = k_2 = 0.5, \zeta = 0.5$ 时, θ 取值对匹配结果的影响. 参考文献 [25], 取 $\theta \in (0, 2.25]$.

通过计算可得, 当 $\theta \in (0, 1.5]$ 时, 匹配结果为 $\{[P_1, S_3], [P_2, S_6], [P_3, S_2], [P_4, S_5], [P_5, S_4], [P_6, S_1]\}$;

当 $\theta \in (1.5, 2.25]$ 时, 其匹配结果为 $\{[P_1, S_3], [P_2, S_6], [P_3, S_2], [P_4, S_1], [P_5, S_4], [P_6, S_5]\}$. 从匹配结果可以看出, 无论损失规避系数如何变化, 匹配对 $[P_1, S_3], [P_2, S_6], [P_3, S_2], [P_5, S_4]$ 始终保持稳定. 这说明客户对于电池的保养、电机的回收、电控的维修、以及 OBC 的备件提供更为关注. 而随着 θ 的改变, P_4, P_6 最优匹配结果发生变化, 说明对于 IGBT 和 BMS 模块客户在知识服务与在线诊断中犹豫. 故 θ 从一定程度上反应了决策者心理行为对匹配结果的影响, 且 θ 值越大, 决策者的损失规避就越大.

4.4.2 不同参数 ζ 的影响分析

根据式子 (11), 权重系数 ζ 会影响最优匹配结果. 故本节研究当 $k_1 = k_2 = 0.5, \theta = 2.25$ 时, ζ 取值对匹配结果的影响. 当 $\zeta = 0, 0.2, 0.4$ 时, 匹配结果为 $\{[P_1, S_3], [P_2, S_6], [P_3, S_2], [P_4, S_5], [P_5, S_4], [P_6, S_1]\}$, 当 $\zeta = 0.6, 0.8, 1$ 时, 即更关注模块间相关性, 结果为 $\{[P_1, S_3], [P_2, S_6], [P_3, S_2], [P_4, S_1], [P_5, S_4], [P_6, S_5]\}$. 可以看出 P_4, P_6 模块的匹配结果发生变化, 说明当决策者越关注模块间相关性, 越希望 IGBT 模块能提供知识服务而 BMS 模块则能进行在线诊断. 对于新能源汽车来说, BMS 模块可监控电池的状态并可保护其不会受到损害. 那么通过在线诊断, 保证 BMS 的可靠性是必不可少的. 由此可说明, 模块间的相互作用会对匹配结果有影响, 表明本文方法的合理性.

表 4 不同 k_1, k_2 取值的最优匹配结果 ($\theta = 2.25, \zeta = 0.5$)

k_1, k_2 取值	匹配结果
(0.0, 1.0), (0.1, 0.9)	$\{[P_1, S_5], [P_2, S_6], [P_3, S_2], [P_4, S_3], [P_5, S_4], [P_6, S_1]\}$
(0.2, 0.8), (0.3, 0.7), (0.4, 0.6), (0.5, 0.5), (0.6, 0.4), (0.7, 0.3), (0.8, 0.2)	$\{[P_1, S_3], [P_2, S_6], [P_3, S_2], [P_4, S_1], [P_5, S_4], [P_6, S_5]\}$
(0.9, 0.1), (1.0, 0.0)	$\{[P_1, S_3], [P_2, S_6], [P_3, S_2], [P_4, S_5], [P_5, S_4], [P_6, S_1]\}$

4.4.3 产品服务模块 k_1, k_2 的影响分析

为观察产品与服务权重对匹配结果的影响, 下面对 k_1, k_2 进行敏感性分析. 研究其值对最优匹配结果的影响, 结果如表 4 所示. 从表 4 中可以看出, 无论 k_1, k_2 如何变化, 匹配对 $[P_2, S_6], [P_3, S_2], [P_5, S_4]$ 保持稳定. 当极度关注产品效用时, P_1 的匹配变为 S_5 , 说明对于新能源汽车产品模块 P_1 来说, 客户比较在乎其在线诊断以及保养, 符合实际情况; 当客户极度关注产品或服务时, P_4, P_6 的匹配对才会改变.

通过以上分析可看出, 决策者心理因素、产品各模块与服务各模块之间的权重 w_p, w_s 以及产品与服务的权重 k_1, k_2 均会对最优匹配结果产生影响. 决策

者在选择新能源汽车时则可根据自身情况, 选取不同的参数, 从而形成自己的个性化产品服务方案.

4.5 对比分析

为了突显本文所提出的双边匹配方法的合理性和有效性, 使用文献 [22] 的方法对上述的双边匹配问题进行求解. 匹配结果为 $\{[P_1, S_3], [P_2, S_6], [P_3, S_2], [P_4, S_5], [P_5, S_4], [P_6, S_1]\}$. 若不考虑模块间关联关系, 即 $\zeta = 0$, 本文 ($\theta = 2.25, k_1 = k_2 = 0.5$) 匹配结果与文献 [22] 匹配结果完全一致. 说明本文方法的合理性.

若考虑模块间关联关系, 当 $\zeta \in (0, 0.4]$ 时, 本文匹配结果与文献 [22] 一致; 当 $\zeta \in (0.4, 1]$ 时, 本文与

文献 [22] 仅 P_4, P_6 匹配对不一致, 其他匹配结果完全一致, 比较结果如表 5 所示 ($\zeta = 0.5$). 造成这种差异的原因一方面在于文献 [22] 中权重是直接给定的, 而本文模块权重的确定不仅考虑了客户对模块关注度, 也通过专家对模块间关联关系进行了深入的分析; 随着模块关联性权重的增大, P_4, S_1 的权重也显著增大, 进一步表明了在新能源汽车中 IGBT 模块、知识服务的重要性; 另一方面, 从表 5 中可看出, 利用文献 [22] 的方法所求 α_{65}, β_{65} 的值均比 α_{45}, β_{45} 的值要高, 说明 P_6 与 S_5 的匹配满意度高于 P_4 与 S_5 的匹配满意度, 但由于 β_{41} (Z 表示足够大的正数) 的值足够小, 导致 P_4 与 S_1 匹配满意度足够低. 故采用文献 [22] 方法 P_4 还是与 S_5 匹配了. 但本文考虑的是产品和服务模块总体优势度, β_{41} 的值小只说明其匹配满意度相对较低, 而文献 [22] 的评估值一旦小于最低接受度, 后悔-欣喜函数值取为 $-Z$, 不符合实际情况. 若评估值只是稍小于最低接受度, 一般来说, 决策者也是可接受的.

表 5 匹配结果比较

方法	文献 [22]	本文
不同匹配对	$[P_4, S_5], [P_6, S_1]$	$[P_4, S_1], [P_6, S_5]$
α_{41}	0.648	0.813
α_{45}	0.684	0.874
α_{61}	0.962	0.910
α_{65}	0.965	0.963
β_{41}	$-Z$	0.057
β_{45}	0.652	0.098
β_{61}	0.931	0.813
β_{65}	0.982	0.890

此外, 相较于文献 [22], 本文所需要提供的参数也更少, 对于客户来说更容易接受, 而文献 [22] 需要选取参考点、最低接受度、后悔规避系数、风险规避系数等参数. 综上, 本文所提出的双边匹配方法更合理、更有效、更适用.

5 结论与启示

本文针对概率语言信息下的双边匹配问题, 提出了考虑模块关联性以及决策者心理行为的匹配方法. 首先, 充分考虑决策者评价的不确定性和偏好性, 得到概率语言信息偏好评估矩阵; 其次, 为便于客户确定模块权重以及考虑到模块间关联性, 将 BWM 和概率语言 DEMATEL 将所求权重进行融合, 使权重更合理; 再次, 考虑到决策者的损失规避心理, 将传统 TODIM 方法进行改进, 并将其应用于匹配问题中, 为

解决双边匹配问题提供新的思路. 最后, 利用新能源汽车产品服务匹配案例对论文所提模型进行验证分析, 探究了不同参数对匹配结果的影响并与已有文献进行对比, 以此证明所提方法的有效性和合理性, 同时弥补产品服务匹配问题的不足, 对企业进行服务创新、实现价值创造有一定的借鉴意义. 但本文考虑的是决策者当前的需求, 事实上, 客户不同阶段需求会有所不同. 因此, 未来将研究多阶段、动态匹配过程, 以期最大化客户满意度以及企业服务效用.

参考文献 (References)

- [1] 贺正楚, 潘红玉, 寻舸, 等. 高端装备制造企业发展模式变革趋势研究 [J]. 管理世界, 2013, (10): 178-179.
(He Z C, Pan H Y, Xu K, et al. The change trend of the development mode for high-end equipment manufacturing enterprises [J]. Management World, 2013, (10): 178-179.)
- [2] 陈志恒, 丁小宸, 金京淑. 中国新能源汽车商业模式的实践与创新分析 [J]. 税务与经济, 2018, (06): 45-51.
(Chen Z H, Ding X C, Jin J S. Analysis of the practice and innovation of china's new energy vehicle business model [J]. Taxation and Economy, 2018, (6): 45-51.)
- [3] 王震坡, 黎小慧, 孙逢春. 产业融合背景下的新能源汽车技术发展态势 [J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(1): 1-10.
(Wang Z P, Li X H, Sun F C. Development trends of new energy vehicle technology under industrial interation [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(1): 1-10.)
- [4] 吴艳, 贺正楚. 新能源汽车与生产服务的产业融合路径及其影响因素 [J]. 系统工程, 2016, 34(6): 31-37.
(Wu Y, He Z C. The industrial interating path and influencing factors of the new energy vehicles and produce services industries [J]. Systems Engineering, 2016, 34(6): 31-37.)
- [5] 武春龙, 朱天明, 张鹏, 等. 基于功能模型和层次分析法的智能产品服务系统概念方案构建 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(7): 853-864+870.
(Wu C L, Zhu T M, Zhang P, et al. Conceptual scheme construction of smart PSS Based on functional model and AHP [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(7): 853-864+870.)
- [6] Mont O, Lindhqvist T. The role of public policy in advancement of product service systems [J]. Journal of Cleaner Production, 2003, 11(8): 905-914.
- [7] 罗建强, 汤娜, 赵艳萍. 基于累积前景理论的服务衍生方案决策 [J]. 工业工程, 2016, 19(2): 80-87.
(Luo J Q, Tang N, Zhao Y P. Service derivation solutions decision-making based on cumulative prospect theory [J]. Industrial Engineering Journal, 2016, 19(2): 80-87.)
- [8] Gale D, Shapley L S. College dmissions and the stability of marriage [J]. The American Mathematical Monthly, 1962, 69(1): 9-15.

- [9] Roth A E. The evolution of the labor market for medical interns and residents: A case study in game theory[J]. *Jof Political Economy*, 1984, 92(6): 991-1016.
- [10] Li M Y, Fan Z P, Li B, et al. A matching method for second-hand goods exchange considering loss aversion of buyer and seller in e-brokerage[J]. *Soft Computing*, 2021, (25)10 : 7041-7057.
- [11] 高宇璇, 杜跃平, 孙秉珍, 等. 考虑患者个性化需求的医疗服务匹配决策方法 [J]. *运筹与管理*, 2019, 28(4): 17-25.
(Gao Y X, Du Y P, Sun B Z, et al. Matching method for medical service considering the personalized demand of patients[J]. *Operations Research and Management Science*, 2019, 28(4): 17-25.)
- [12] 万树平, 李登峰. 具有不同类型信息的风险投资商与投资企业多指标双边匹配决策方法 [J]. *中国管理科学*, 2014, 22(2): 40-47.
(Wan S P, Li D F. Decision making method for multi-attribute two-sided matching problem between venture capitalists and investment enterprises with different kinds of information[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(2): 40-47.)
- [13] Yu D J, Xu Z S. Intuitionistic fuzzy two-sided matching model and its application to personnel-position matching problems[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2020, 71(2) : 312-321.
- [14] Miao Y M, Du R, Li J et al. A two-sided matching model in the context of B2B export cross-border e-commerce[J]. *Electronic Commerce Research*, 2019, 19(4): 841-861.
- [15] 乐琦, 张莉莉. 基于新排序函数的直觉模糊双边匹配决策方法 [J]. *控制与决策*, 2020, 35(4): 985-992.
(Yue Q, Zhang L L. Decision method for intuitionistic fuzzy two-sided matching based on the new ranking function[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(4): 985-992.)
- [16] Li B D, Yang Y, Su J F, et al. Two-sided matching decision-making model with hesitant fuzzy preference information for configuring cloud manufacturing tasks and resources[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2020, 31(8): 2033-2047.
- [17] Chen X, Wang J, Liang H, et al. Hesitant multi-attribute two-sided matching: A perspective based on prospect theory[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2019, 36(6) : 6343-6358.
- [18] 曲国华, 许岩, 曲卫华, 等. 基于区间对偶犹豫模糊信息双向投影技术的双边公平匹配决策方法 [J]. *系统科学与数学*, 2021, 41(5): 1256-1275.
(Qu G H, Xu Y, Q W H, et al. Two-sided fair-matching decision method with interval dual hesitation fuzzy information based on bidirectional projection method[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2021, 41(5): 1256-1275.)
- [19] Yue Q, Zhang L L. TOPSIS based two-sided matching under interval-valued intuitionistic fuzzy environment in virtual reality technology transfer[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 101024-101034.
- [20] Yue Q, Zhang L L, Yu B W, et al. Two-sided matching for triangular intuitionistic fuzzy numbers in smart environmental protection[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 42426-42435.
- [21] Pang H, Wang H, Xu Z S. Probabilistic linguistic term sets in multi-attribute group decision making[J]. *Information Sciences*, 2016, 369 : 128-143.
- [22] Li P, Wang, N N, Wei C P, et al. A two-sided matching method considering the lowest value of acceptability with regret theory for probabilistic linguistic term sets[J]. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 2021, 12(4): 917-930.
- [23] Li B, Zhang Y X, Xu Z S. The aviation technology two-sided matching with the expected time based on the probabilistic linguistic preference relations[J]. *Journal of the Operations Research Society of China*, 2020, 8(1) : 45-77.
- [24] Li B, Zhang Y X, Xu Z S. The medical treatment service matching based on the probabilistic linguistic term sets with unknown attribute weights[J]. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2020, 22(5): 1487-1505.
- [25] Teng F, Liu P D. A large group decision-making method based on a generalized Shapley probabilistic linguistic Choquet average operator and the TODIM method[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 151: 106971.
- [26] Rezaei J. Best-worst multi-criteria decision-making method[J]. *Omega*, 2015, 53 : 49-57.
- [27] Guo S, Zhao H R. Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2017, 121: 23-31.
- [28] 张发明, 王伟明. 基于后悔理论和 DEMATEL 的语言型多属性决策方法 [J]. *中国管理科学*, 2020, 28(6): 201-210.
(Zhang F M, Wang W M. A New Linguistic multiple attribute decision making method based on regret theory and DEMATEL[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2020, 28(6): 201-210.)
- [29] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk[J]. *Economica*, 1979, 47(2): 263-291.

作者简介

赵敬华(1984—), 女, 副教授, 从事管理决策分析、互动创新等的研究, E-mail: zhaojinghua@usst.edu.cn;

张艳(1998—), 女, 硕士研究生, 从事管理决策分析的研究, E-mail: 202671061@st.usst.edu.cn;

林杰(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 从事决策支持系统、供应链优化与仿真、数据挖掘等的研究, E-mail: jielinf@163.com.