

基于结构熵权 TOPSIS 法的产品设计方案评估研究

陈 香, 卫 华

(江南大学设计学院, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 为了提高企业在产品设计方案评估阶段进行合理决策的效率, 提出了一种基于结构熵权双基点法(TOPSIS)的产品设计方案评估方法。在评估流程中, 首先确定产品设计方案评价指标, 专家对各评价指标进行重要度排序, 在得到了“典型排序”后经过结构熵计算和“认识盲度”计算, 得出各评价指标的权重, 以替代双基点法中专家主观设定的权重系数; 其次, 构建设计方案各指标加权标准决策的矩阵, 进而求得各指标的理想解, 基于以上可得到各设计方案距离理想解的相对贴进度, 经对比后确定设计方案的排序情况, 从而得到各方案的优劣。最后, 将该评估流程应用于录音笔设计方案评估的决策中, 验证了该方法的可行性与有效性。

关 键 词: 结构熵权法; 双基点法; 评价指标权重; 方案评估; 录音笔设计
中图分类号: TP 391 **DOI:** 10.11996/JGj.2095-302X.2020030446
文献标识码: A **文章编号:** 2095-302X(2020)03-0446-07

Research on product design scheme evaluation based on TOPSIS method of structure entropy weight

CHEN Xiang, WEI Hua

(School of Design, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of rational decision-making in the process of product design scheme evaluation, this paper proposed a method of product design scheme evaluation based on TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution) and the method of structure entropy weight. In the evaluation process, the evaluation indexes of product design scheme were determined first, and then the experts ranked each evaluation index based on its priority. After obtaining the “typical ranking”, the weight of each evaluation index was calculated through structural entropy calculation and “cognition blindness”, thus enabling itself to replace the weight coefficient set by experts in TOPSIS method. Next, the matrix of weighted standard decision-making for each index of design scheme was constructed, and then the ideal solution of each index was obtained. Based on the above procedures, the relative closeness degree of each design scheme to its ideal solution can be obtained, and the corresponding ranking of design schemes can be determined after comparison. Finally, the evaluation process was applied to the decision-making of the design scheme evaluation of recording pens, which verified the feasibility and effectiveness of this method.

Keywords: structural entropy weight method; technique for order preference by similarity to ideal solution; weight of evaluation index; scheme evaluation; recording pen design

企业的一个完整产品开发流程包括产品定义、工业设计、结构设计、批量生产、市场销售及售后服务等内容,每一件产品的成功与否都离不开每一个环节的匹配程度。为了保证产品的用户满意度、创新性和可实现性,在产品设计方案评估阶段,企业各部门专家从不同的专业视角对各产品设计方案进行综合评估后,确定最终的方案。而产品设计方案的评价指标、规则和方式日益多样、复杂,受各部门研究者的行业背景、行为偏好、认知能力和专业经验的影响,各专家对不同评价指标的权重认知、对同一对象在同一评价指标下的评价也会存在差异性,从而使整个评价过程存在主观性和不确定性。目前研究中主要存在的问题有:

(1) 在建立设计方案的评价指标体系上,缺乏统一的标准。目前的研究主要是从设计的角度建立评价体系,以满足用户的需求和满意度。如吴剑斌等^[1]从儿童产品的造型、颜色、可操作性和人机关系等4个角度对设计方案进行评估,通过模糊评价法量化抽象语义,得出优选方案;李争和王金凤^[2]提出利用层次分析法在文化创意产品造型设计中建立评价指标体系,分别从形态、功能、色彩、文化、艺术等层面进行评价;吕欣和刘玉云^[3]从企业开发的角度分别从观察者、产品使用者和生产者层面确定不同的评价指标,提出一种基于AHP-TOPSIS的儿童安全座椅设计方案评价模型。

(2) 在确定各评价指标的权重优先级上,基于产品设计方案评估的运用较少。当前国内外学者确定指标权重的方法主要有3类:主观赋权法(如层次分析法、粗糙集赋权法)、客观赋权法(如熵权法、主成分分析法)和综合赋权法(结合前2类)。如张璐等^[4]以三角模糊数量化不确定的情感需求信息,结合信息熵方法确定各目标意向的权重,减少专家在评价信息中的主观性,并运用模糊TOPSIS方法实现设计方案的优选;周伟等^[5]运用粗糙集理论精简评价指标,并定义指标的量化方法,对指标进行重要度分析,计算评价指标的模糊权重;王年文和徐丽^[6]提出一种基于多感官评价方法的多线切割机造型设计研究中运用模糊层次分析法计算出感官指标的权重,进而明确产品造型设计要素和优先级;马健君等^[7]运用结构熵权法确定某轻客车各性能权重系数,并与用户评分结合,得到整车性能评价结果。

基于上述研究,主观赋权法存在夸大专家主观判断的风险,而客观赋权法计算过程,虽然基于量化的数据事实,但可导致最终结果偏离实际情况。

而结构熵权法能够结合主观和客观赋值^[7]、定性和定量分析,合理地进行评价指标权重系数的计算,但此方法在产品设计方案评估研究中的运用较缺乏。

因此,本文提出一种基于结构熵权TOPSIS法的产品设计方案评估的模型、流程及其应用案例。首先,在建立产品设计评价指标体系后,引入结构熵权法建立指标评价矩阵并进行结构熵计算;其次,对认知盲度进行处理,得到评价指标的权重系数比。最后,在方案评估阶段,引入TOPSIS法,从而实现设计方案优先级的选定,并用产品设计的实例——录音笔,验证该方法的有效性。

1 设计方案评价指标体系的建立及流程

1.1 产品设计方案评价指标体系的建立

目前的文献研究中,关于评价指标体系的建立主要从设计专业的角度进行考量,如感性工学、多感官体验、用户满意度和人机工程学等。本文评价指标的建立是从企业管理人员进行决策的角度进行。企业开发新产品,对设计部门形成的不同设计方案进行评估,除了设计方案的设计水准,还要考虑到方案的量产性、硬件选型、品牌效应、市场推广等,在每个维度下还需考虑各种次级指标。因此,对方案的决策是一个涉及到多部门、多因素互相制约的复杂过程。

本文在建立录音笔产品的评价指标体系前,研究人员通过查阅文献、头脑风暴、结合企业现状,初步选定了6个一级指标,每个一级指标包括次级和三级共37个评价指标。为了保证评价指标的合理性、有效性和实操性,经过专家讨论、筛选,确定了2个一级指标,分别为设计层和量产层,整个产品设计方案评价指标体系见表1。

表1 产品设计方案评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of product design scheme

一级指标	二级指标	三级指标
设计层	指标 ₁ ,指标 ₂ ,...,指标 _n	指标 ₁ ,指标 ₂ ,...,指标 _n
量产层	指标 ₁ ,指标 ₂ ,...,指标 _n	指标 ₁ ,指标 ₂ ,...,指标 _n

1.2 产品设计方案的评价流程

(1) 建立设计方案的评价指标体系。根据初步研究,建立了产品设计方案的评价指标体系,并通过专家讨论和选择确定了合理的评价指标集。

(2) 计算各级评估指标的权重。选出企业内不同部门的资深专家5名,分别对各自领域的各项

指标进行打分, 创建各指标的评价矩阵, 经过结构熵计算和认知盲度处理, 得到各级评价指标的权重数值。

(3) 对设计方案进行评价决策。选出专家 8 名, 结合现有的设计方案对每个指标进行打分, 创建决策矩阵; 对其进行无量化处理, 创建标准化决策矩阵; 结合利用结构熵法计算得到各指标的权重数值, 构造加权规范化矩阵, 确定正理想解和负理想解, 最后计算各设计方案的距离尺度和贴近度, 从而确定所有设计方案的排序情况。

2 结构熵权 TOPSIS 法的方案评估模型

2.1 结构熵权法确定各级评价指标权重系数

本文采用的结构熵权法是一种结合主观赋权和客观赋权确定权重系数的方法, 其结合德尔菲专家调查法和模糊分析法^[8], 对专家意见进行处理, 形成“典型排序”, 并根据给定的熵决策公式进行熵计算和“盲目性”处理, 减少“典型排序”的不确定性, 从而确定各指标的权重系数。同时, 本研究中评价指标体系按照专业领域进行区分, 专家们分别对各自领域内的评价指标进行评价。在进行各级指标权重计算中, 应遵循同级指标比较原则, 确定各级指标相对权重后, 通过计算得出所有指标的权重系数比值。

(1) 收集专家评价意见, 形成“典型排序”矩阵。设每个领域的专家数为 k , 评价指标集排序为 $U=(u_1, u_2, \dots, u_n)$, 每名专家利用自己的经验对各指标进行重要度排序, 形成评价指标“典型排序”数组, 记作 $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ 。其中, $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$ 可取 $\{1, 2, 3, \dots, n\}$ 自然数中的任意一种, 如 $a_{i1}=a_{i2}=3$, 代表 2 个指标同等重要。那么, k 名专家对同级各评价指标的“典型排序”矩阵记为 $\mathbf{A}(\mathbf{A}=(a_{ij})_{k \times n}, i=1, 2, \dots, k, j=1, 2, \dots, n)$, 其中 a_{ij} 为第 i 个专家对第 j 个指标 u_j 的评价。

(2) 结构熵计算, 构造隶属矩阵。“典型排序”中专家对评价指标的意见往往会因为择重标准不同而形成偏差, 因此需要对其形成的定性判断结论进行定额转化, 即结构熵计算, 为减少主观因素带来的误差。进行结构熵计算的函数为

$$\chi(a_{ij}) = -\lambda p_i(a_{ij}) \ln p_i(a_{ij}) \quad (1)$$

其中取 $p_i(a_{ij}) = \frac{m-a_{ij}}{m-1}$, $\lambda = \frac{1}{\ln(m-1)}$ 简化可得

$$\chi(a_{ij}) = -\frac{(m-a_{ij}) \ln(m-a_{ij})}{(m-1) \ln(m-1)} + \frac{m-a_{ij}}{m-1} \quad (2)$$

其中, m 为转化参数量, 取 $m=j+2$ (j 为指标最大顺序号), 可得

$$\chi(a_{ij}) = -\frac{(j+2-a_{ij}) \ln(j+2-a_{ij})}{(j+1) \ln(j+1)} + \frac{j+2-a_{ij}}{j+1} \quad (3)$$

将式(3)两边同时除以 $\frac{j+2-a_{ij}}{j+1}$ 可得

$$\chi(a_{ij}) / \frac{j+2-a_{ij}}{j+1} = 1 - \frac{\ln(j+2-a_{ij})}{\ln(j+1)} \quad (4)$$

令 $\mu(a_{ij}) = 1 - \chi(a_{ij}) / \frac{j+2-a_{ij}}{j+1}$, 则根据式(4)可求得

隶属函数为

$$\mu(a_{ij}) = \frac{\ln(j+2-a_{ij})}{\ln(j+1)} \quad (5)$$

由于信息熵是用来度量指标数据的效用价值^[9], a_{ij} 的取值越小, 指标重要性越高, $\chi(a_{ij}) \in (-1, 0)$ 。当 a_{ij} 取值为 1 时, $\chi(a_{ij})=0$, 当 a_{ij} 取值越大, $\chi(a_{ij})$ 绝对值越大。为便于计算, 定义 $\mu(a_{ij})$ 为指标的信息效用价值。且 $\mu(a_{ij}) \in (0, 1)$, 为 a_{ij} 对应的隶属函数值, 其中 $a_{ij}=1, 2, \dots, j$ (j 为实际最大顺序号)。

将单一“典型排序数值” a_{ij} 代入式(5)可得到 a_{ij} 的定量转化值 $\mu(a_{ij})$, 即为数值 a_{ij} 的隶属度, 则可得隶属度矩阵为: $\mathbf{B}=(b_{ij})_{k \times n}(i=1, 2, \dots, k; j=1, 2, \dots, n)$, 其中, b_{ij} 为第 i 名专家对第 j 个指标 u_j 评价的隶属度。

(3) 基于“专家平均认识度”和“认识盲度”, 进行评价指标总体认识度计算, 再通过归一化处理, 确定评价指标的权重系数。参与评价指标排序的 k 名专家在评价过程中对各指标的“一致看法”为专家的平均认识度, 记为 b_j , 则可得平均认识度为

$$b_j = (b_{1j} + b_{2j} + \dots + b_{kj}) / k \quad (6)$$

其中, b_{ij} 为第 k 名专家对第 j 个指标 u_j 的认识度(隶属度)。专家在评价过程中由于认知产生的不确定性为“认识盲度”, 记为 Q_j , 则

$$Q_j = \left| \left[\left[\max_i (b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{kj}) - b_j \right] + \left[\min_i (b_{1j}, b_{2j}, \dots, b_{kj}) - b_j \right] \right] / 2 \right| \quad (7)$$

对于同级的每一个指标 u_j , 参与评价过程的 k 名专家关于 u_j 的总体认识度记作 x_j , 则

$$x_j = b_j(1 - Q_j), x_j > 0 \quad (8)$$

由式(8)得到 k 名专家全体对评价指标 u_j 的评价向

量为

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (9)$$

最后通过将评价向量 \mathbf{X} 归一化处理可以得到各评价指标 u_j 的权重系数, 记作 α_j , 则

$$\alpha_j = x_j / \sum_{j=1}^n x_j \quad (10)$$

显然符合, $\alpha_j > 0$, 且 $\sum_{j=1}^n \alpha_j = 1$ 。则评价指标集合

$U=(u_1, u_2, \dots, u_n)$ 的权重系数值集合记作 $w=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, 反映了 k 名专家对评价指标集合 U 的重要性的整体判断, 这是同级评价指标间的权重系数, 以此类推可以得出所有评价指标的权重系数集 W 。

2.2 改进 TOPSIS 方法的设计方案评价流程

在进行方案评价时, 涉及到众多评价指标, 优选出最佳方案是一个多目标综合决策的过程。贴近于理想值的排序方法——熵权-TOPSIS 法是解决该类问题的主要方法^[10], 该方法能够计算出评价方案与正理想解和负理想解之间的距离进行排序, 若评价对象距离正理想解最近且距离负理想解最远, 则为最佳方案, 反之最差^[11]。

但目前 TOPSIS 方法所采用的指标权重基本上是由专家主观确定为主, 其客观准确度较低。因此, 本研究用客观的结构熵权法确定评价指标的权重系数值, 取代以专家主观确定的权重, 进而根据各评价指标的属性值, 对各设计方案进行综合评价。

(1) 建立设计方案评价决策矩阵及标准化处理。设待评价的产品设计方案集合记作 $P=(p_1, p_2, \dots, p_m)$, 评价指标 $u_j(j=1, 2, \dots, n)$ 的取值为 c_{ij} , 则可初步建立决策矩阵 $\mathbf{D}=(c_{ij})_{m \times n}$, ($i=1, 2, \dots, m$, $j=1, 2, \dots, n$), c_{ij} 为专家对第 i 个设计方案第 j 个指标 u_j 的评价数值。由于评价指标体系中不同属性、不同层级的指标不能直接比较, 需要对各类型指标之间进行无量化处理, 则规范化后的标准决策矩阵

$$\mathbf{R}=(r_{ij})_{(m \times n)}, \text{ 其中 } r_{ij} = c_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m c_{ij}^2}。$$

(2) 根据结构熵权法确定的各评价指标权重系数, 构建加权标准决策矩阵。由前文可知, 整个评价指标体系下各评价指标权重系数集合 $W=(w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_n)$, 其中 n 为所有评价指标的数目且 $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。结合设计方案规范化后的标准决策矩阵 \mathbf{R} 中的设计指标属性值, 可得到加权标准决策矩阵 \mathbf{V} , 即

$$\mathbf{V} = (v_{ij})_{m \times n} = (r_{ij} \times w_j)_{m \times n} \quad (11)$$

其中, w_j 为第 j 个评价指标的权重, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ 。

(3) 确定正理想值和负理想值^[12], 评价指标的属性可分为 2 类: 效益属性值 J 和成本类型属性值 J' ^[13]。正理想解中包含最多和最少的成本型属性值, 反之为负理想解。各个设计方案评价指标正理想解和负理想解分别记作 V^+ 和 V^- , 其可表达为

$$\begin{aligned} V^+ &= \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_n^+\} \\ &= \{(\max v_{ij} | j \in J), (\min r_{ij} | j \in J')\} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} V^- &= \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\} \\ &= \{(\min v_{ij} | j \in J), (\max r_{ij} | j \in J')\} \end{aligned} \quad (13)$$

(4) 求各方案的距离尺度。各设计方案到正理想解和负理想解的距离分别记作 L_i^+ 和 L_i^- , 则

$$\begin{aligned} L_i^+ &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \\ L_i^- &= \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \end{aligned} \quad (14)$$

其中, L_i^+ 和 L_i^- 分别为设计方案 p_i 到最优与最劣方案的欧氏距离; v_i^+ 和 v_i^- 分别为第 j 个评价指标下的最优和最劣解; v_{ij} 为第 i 个设计方案在第 j 个评价指标下的加权标准评价价值。

(5) 计算各方案到理想解的贴近度。各产品设计方案到理想解的相对贴近度记作 S_i^+ , 即

$$S_i^+ = L_i^- / (L_i^+ + L_i^-) \quad (15)$$

其中, $0 < S_i^+ < 1$, S_i^+ 值越大代表方案距离最由解越近、方案越优。根据各个设计方案的 S_i^+ 值的大小排序可得到设计方案的优劣排序。

3 结构熵权 TOPSIS 法的实例应用

为了验证基于结构熵权 TOPSIS 法的方案评估模型的有效性, 本文以某硬件公司开发的 3 款便携式录音笔设计方案 p_1 (图 1 和图 2)、 p_2 (图 3 和图 4)、 p_3 (图 5 和图 6) 的评估为例展开研究。每个方案在设计上存在差异性, 决策人员基于本文的结构熵权 TOPSIS 法的产品设计方案评估模型, 并进行综合评价, 具体步骤如下:

3.1 结构熵权法确定各级评价指标权重系数

经过专家讨论、合理筛选后的录音笔设计方案评价指标体系见表 2, 由 1~3 级组成的评价指标集合 $U=\{(u_1, u_2, u_3, u_4), (u_5, u_6, u_7, u_8), (u_9, u_{10}, u_{11}), [(u_{12}, u_{13}), (u_{14}, u_{15})]\}$, 该体系是针对

录音笔产品而形成的指标集合，当产品门类改变时，评价指标会有变动。不同专业领域各选5名专家根据自己的经验对各级指标进行评价、排序，得到“典型排列”矩阵。其中得分最高值为每个层级的指标数目 n ，分数1为最重要，分数越大则越不重要，分数值相同为同等重要。

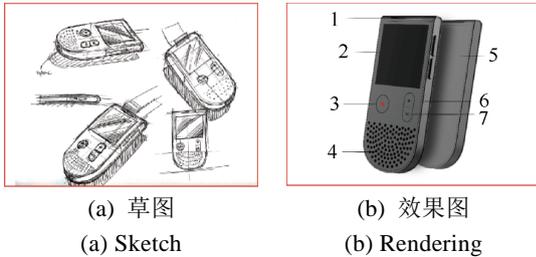


图1 方案 p_1 展示(1. 挂绳孔; 2. 屏幕; 3. 录音键; 4. 音孔、MIC; 5. 音量键; 6. 复位; 7. 开始)
Fig. 1 Display of scheme p_1 (1. Lanyard hole; 2. Screen; 3. Record button; 4. Sound hole & MIC; 5. Volume button; 6. Reset; 7. Start button)

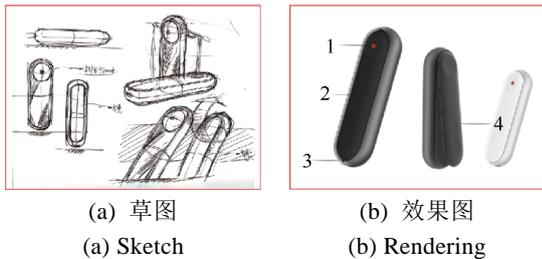


图2 方案 p_2 展示 (1. 录音键、暂停键、标记键; 2. 指示灯; 3. MIC; 4. 背夹)
Fig. 2 Display of scheme p_2 (1. Record button, pause button, mark button; 2. indicator light; 3. MIC; 4. back clip)

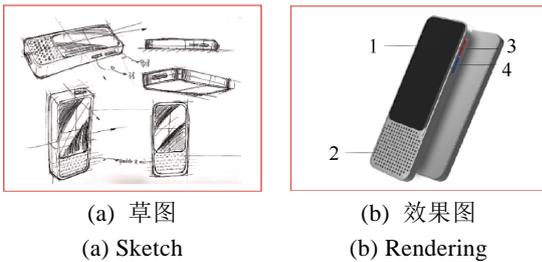


图3 方案 p_3 展示(1. 屏幕; 2. 音孔、MIC; 3. 录音键; 4. 收藏键)
Fig. 3 Display of scheme p_3 (1. Screen; 2. Sound hole & MIC; 3. Record button; 4. Mark button)

以“功能指标”为例，该指标下的三级指标集 (u_1, u_2, u_3, u_4) 中有4项，则最高分为4，得到其“典型排序”矩阵 A_1 为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 2 & 4 \\ 2 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1 & 2 & 2 & 4 \end{bmatrix}$$

表2 产品设计方案评价矩阵

Table 2 Evaluation matrix of product design scheme

一级指标(u)	二级指标(u')	三级指标(u_j)
设计层 u_a	功能 u'_1	远场录音 u_1
		近场录音 u_2
		蓝牙传输 u_3
		拍摄记录 u_4
		形态设计 u_5
	外观 u'_2	色彩设计 u_6
		材质设计 u_7
		纹理设计 u_8
		人机合理 u_9
		易操作性 u_{10}
		续航 u_{11}
量产层 u_b	结构 u'_4	装配合理 u_{12}
		模具开发 u_{13}
	工艺 u'_5	生产工艺 u_{14}
		表面处理 u_{15}

将 A_1 代入式(4)中，经过结构熵计算，得到其隶属度矩阵 B_1

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.63 & 0.50 & 0.86 \\ 1.00 & 0.63 & 0.79 & 0.43 \\ 0.63 & 0.63 & 0.50 & 0.43 \\ 1.00 & 1.00 & 0.50 & 0.86 \\ 1.00 & 0.63 & 0.79 & 0.43 \end{bmatrix}$$

将其分别代入式(6)和(7)中，可得到 (u_1, u_2, u_3, u_4) 的专家“共同认识度”集和“认识盲区”集，分别为 $b=(0.93, 0.70, 0.62, 0.60)$ ， $Q=(0.23, 0.24, 0.05, 0.09)$ 将其代入式(8)和(9)中可得到5名专家全体对评价指标集 (u_1, u_2, u_3, u_4) 的评价向量 $X_1=(0.73, 0.53, 0.59, 0.55)$ ，将 X_1 代入式(10)中，归一化处理可得到评价指标 (u_1, u_2, u_3, u_4) 的权重系数集 $w_1=(0.30, 0.22, 0.25, 0.23)$ 。以此类推得到各部门专家对各级评价指标的权重系数，见表3。

表3 各级评价指标的权重系数比值

Table 3 weight coefficient ratio of evaluation indexes at all levels

一级指标(u)	权重	二级指标(u')	权重	三级指标(u_j)	权重
设计层 u_a	0.76	功能 u'_1	0.41	远场录音 u_1	0.30
				近场录音 u_2	0.22
				蓝牙传输 u_3	0.25
				拍摄记录 u_4	0.23
				形态设计 u_5	0.34
	0.30	外观 u'_2	0.30	色彩设计 u_6	0.21
				材质设计 u_7	0.26
				纹理设计 u_8	0.19
				人机合理 u_9	0.33
				易操作性 u_{10}	0.38
				续航 u_{11}	0.29
量产层 u_b	0.58	结构 u'_4	0.58	装配合理 u_{12}	0.46
				模具开发 u_{13}	0.54
	0.24	工艺 u'_5	0.42	生产工艺 u_{14}	0.63
				表面处理 u_{15}	0.37

将各级评价指标的权重系数归一化处理可得到所有评价指标集合 U 的权重系数比值 $W=(0.094, 0.076, 0.078, 0.061, 0.075, 0.052, 0.059, 0.044, 0.071, 0.084, 0.064, 0.065, 0.077, 0.063, 0.037)$ 。对各评价指标的权重系数比值进行大小排序, 得到录音笔产品设计方案的评价指标重要程度顺序为: 远场录音>易操作性>蓝牙传输>近场录音>模具开发>形态设计>人机合理>装配合理>续航>生产工艺>拍摄记录>材质设计>色彩设计>纹理设计>表面处理。

经排序, 可得到同专业或不同专业评价指标的重要度对比。例如在功能层中, 涉及录音笔产品属性的录音与蓝牙功能最为重要, 而拍摄记录作为一个附属功能可有可无; 在外观设计, 形态设计影响用户的直观感受, 较为重要; 在体验层中, 人机尺寸、易操作性与续航能力直接影响用户的使用满意度。

3.2 改进 TOPSIS 法的设计方案评价

现有待评价的设计方案集 $P=(p_1, p_2, p_3)$ 共 3 个方案, 评价指标集 $U=(u_1, u_2, \dots, u_{15})$ 共 15 个评价指标。决策团队(2 名企业决策者, 2 名工业设计师, 2 名用户, 1 名结构设计师, 1 名硬件工程师)共 8 名决策专家对每个方案 $p_i(i=1, 2, 3)$ 按照产品设计评价指标体系(表 3)利用打分法进行评价。打分范围为 0~10 分, 其中, (3,5]为较差, (5,6]为一般, (6,8]为较好, (8,10]为很好。可得到初步决策矩阵 D , 即

$$D = \begin{bmatrix} 6.3 & 7.4 & 6.9 \\ 5.6 & 8.0 & 7.2 \\ 7.9 & 7.1 & 6.5 \\ 8.1 & 4.5 & 6.2 \\ 6.0 & 8.2 & 6.8 \\ 9.1 & 8.9 & 7.8 \\ 5.3 & 6.7 & 5.5 \\ 6.1 & 7.4 & 8.1 \\ 8.0 & 8.9 & 9.1 \\ 4.6 & 7.7 & 5.0 \\ 7.8 & 8.2 & 8.4 \\ 5.3 & 6.6 & 7.0 \\ 8.2 & 7.9 & 7.0 \\ 6.1 & 7.1 & 6.8 \\ 4.3 & 5.6 & 7.1 \end{bmatrix}$$

对初步决策矩阵 D 进行无量化处理, 得到规范化后的标准决策矩阵 R , 即

$$R = \begin{bmatrix} 0.529 & 0.622 & 0.579 \\ 0.463 & 0.714 & 0.595 \\ 0.632 & 0.568 & 0.520 \\ 0.880 & 0.489 & 0.674 \\ 0.492 & 0.672 & 0.557 \\ 0.611 & 0.597 & 0.523 \\ 0.520 & 0.657 & 0.539 \\ 0.484 & 0.587 & 0.643 \\ 0.533 & 0.494 & 0.607 \\ 0.447 & 0.748 & 0.397 \\ 0.553 & 0.582 & 0.596 \\ 0.482 & 0.600 & 0.636 \\ 0.612 & 0.590 & 0.522 \\ 0.526 & 0.612 & 0.586 \\ 0.430 & 0.560 & 0.710 \end{bmatrix}$$

将 R 代入式(11)中可得到加权标准决策矩阵 V , 即

$$V = \begin{bmatrix} 0.037 & 0.143 & 0.040 \\ 0.024 & 0.236 & 0.030 \\ 0.036 & 0.432 & 0.030 \\ 0.247 & 0.026 & 0.036 \\ 0.028 & 0.138 & 0.032 \\ 0.021 & 0.221 & 0.018 \\ 0.023 & 0.329 & 0.024 \\ 0.015 & 0.019 & 0.221 \\ 0.029 & 0.027 & 0.333 \\ 0.027 & 0.246 & 0.024 \\ 0.026 & 0.027 & 0.128 \\ 0.036 & 0.044 & 0.547 \\ 0.254 & 0.052 & 0.046 \\ 0.039 & 0.345 & 0.043 \\ 0.018 & 0.024 & 0.131 \end{bmatrix}$$

通过分析可知评价指标中属于效益型属性值 J 包括 u_{1-12}, u_{14-15} , 成本型属性值包括 u_{13} 。将 V 代入式(12)和(13)中可得到正理想解 V^+ 和负理想解 V^- , 分别为

$$V^+ = (0.143, 0.236, 0.423, 0.247, 0.138, 0.221, 0.329, 0.221, 0.333, 0.246, 0.128, 0.547, 0.046, 0.345, 0.131)$$

$$V^- = (0.037, 0.024, 0.030, 0.026, 0.028, 0.018, 0.023, 0.015, 0.027, 0.024, 0.026, 0.036, 0.254, 0.039, 0.018)$$

将加权标准决策矩阵 V 、正理想解 V^+ 与负理想解 V^- 代入式(14), 可得到各设计方案的距离尺度 L_i^+ 与 L_i^- 分别为

$$L_i^+ = (0.233, 0.026, 0.567)$$

$$L_i^- = (0.026, 0.366, 0.128)$$

将 L_i^+ 与 L_i^- 代入式(15), 可得到各设计方案距离

理想解的相对贴近度 S_i^+ 为

$$S_i^+ = (0.441, 0.865, 0.144)$$

3种方案与理想解的相对接近程度由大到小为 $p_2 > p_1 > p_3$, 贴近度越近, 方案越接近理想值, 方案2为最优解。通过各部门专家意见, 一致认为方案2不仅从交互上单按键操作体验丰富、产品形态圆润简约, 而且设计可实现程度上较易, 为理想方案。同时, 也验证了评价结果的可靠性。

4 结束语

(1) 本文从企业开发产品角度出发, 提出基于结构熵权和TOPSIS法两者相结合, 运用并进行合理筛查后, 建立了科学系统的产品设计方案评价指标体系和模型。方案评估时, 基于结构熵权法结合主观赋值和客观赋值, 通过定性、定量分析, 合理地进行评价指标权重系数的计算; 基于传统的TOPSIS法结合结构熵权法计算所得到的评价指标权重系数, 可获取产品设计方案的理想方案和负理想方案, 通过计算待评估方案与两者的贴近度, 可选出产品设计中的最佳方案。最后, 通过一种录音笔的实例设计, 验证了产品设计评价模型应用的有效性。为企业在开发产品前期的设计方案评估阶段, 提供了一种创新的评价模型和方法, 也为市场上其他产品的设计评价提供了参考。

(2) 本文提出的产品设计方案评估模型, 在辅助各部门专家对设计方案进行评估时的数据处理具有一定的客观性。同时对录音笔的评价指标体系是针对该产品进行的, 其他类产品可根据产品特定情况对评价指标体系进行修改后再确定。在后续的设计实践中, 将针对不同类型产品确定不同的评价指标, 使得评价研究范围上更全面。

参考文献

- [1] 吴剑斌, 陈香, 张凌浩. 儿童产品造型语义模糊评价[J]. 机械设计, 2018, 35(2): 124-128.
WU J B, CHEN X, ZHANG L H. Fuzzy evaluation of children product modeling semantics[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(2): 124-128 (in Chinese).
- [2] 李争, 王金凤. 模糊评价法在文化创意产品造型设计中的应用研究[J]. 现代电子技术, 2019, 42(13): 131-133.
LI Z, WANG J F. Application of fuzzy evaluation method in cultural and creative product style design[J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(13): 131-133 (in Chinese).
- [3] 吕欣, 刘玉云. 基于AHP-TOPSIS方法的儿童安全座椅设计方案评价研究[J]. 包装工程, 2019, 40(14): 150-155.
LYU X, LIU Y Y. Evaluation of design alternatives for child safety seat based on AHP-TOPSIS[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(14): 150-155 (in Chinese).
- [4] 张璐, 李巨韬, 赵艳云, 等. 基于用户感性需求的产品设计方案评估方法[J]. 运筹与管理, 2019, 28(1): 152-157.
ZHANG L, LI J T, ZHAO Y Y, et al. Evaluation method for product design based on users' emotional needs[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(1): 152-157 (in Chinese).
- [5] 周伟, 肖莉明, 黄广全, 等. 粗糙集指标简约的装配设计方案模糊评价[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(6): 24-34.
ZHOU W, XIAO L M, HUANG G Q, et al. Fuzzy evaluation of assembly design scheme based on attribute value reduction of rough sets[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(6): 24-34 (in Chinese).
- [6] 王年文, 徐丽. 基于感官评价方法的多线切割机造型设计研究[J]. 机械设计, 2018, 35(5): 116-120.
WANG N W, XU L. Research on modeling design of multi-wire cutting machine based on sensory evaluation method[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(5): 116-120 (in Chinese).
- [7] 马健君, 赵礼辉, 李通, 等. 基于用户行驶需求的轻客整车性能评价[J]. 机械强度, 2019, 41(1): 91-97.
MA J J, ZHAO L H, LI T, et al. Vehicle performance evaluation of light bus based on user driving needs[J]. Journal of Mechanical Strength, 2019, 41(1): 91-97 (in Chinese).
- [8] 程启月. 评测指标权重确定的结构熵权法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1225-1228.
CHENG Q Y. Structure entropy weight method to confirm the weight of evaluating index[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(7): 1225-1228 (in Chinese).
- [9] 胡珺, 李春晖, 贾俊香, 等. 基于结构熵权的黄河上游水资源脆弱性模糊综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6): 17-22.
HU J, LI G H, JIA J X, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water resources vulnerability based on structure entropy weight method in upper reaches of the Yellow River basin[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2012, 23(6): 17-22 (in Chinese).
- [10] ZYOD S H, FUCHS-HANUSCH D. A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques[J]. Expert Systems With Applications, 2017, 78: 158-181.
- [11] SUNIL C. Hybrid FAHP-TOPSIS approach for performance evaluation of the V down perforated baffle roughened rectangular channel[J]. Energy, 2015, 84: 432-442.
- [12] WANG X M. Mining method choice based on AHP and fuzzy mathematics[J]. Science and Technology, 2008, 39(5): 875-880.
- [13] 陈香, 邱大鹏. 基于模糊Kano模型与TOPSIS法的产品设计研究[J]. 图学学报, 2019, 40(2): 315-320.
CHEN X, QIU D P. Research of product design based on fuzzy-Kano model and TOPSIS[J]. Journal of Graphics, 2019, 40(2): 315-320 (in Chinese).