

高压电器设备包装材料优选研究

高岭, 王璞, 伊朋

(西安西电开关电气有限公司, 西安 710077)

摘要: **目的** 实现高压电器设备包装材料的优选, 提高包装材料选择的一致性和经济型, 降低制造成本。**方法** 建立一种多目标材料选择优选模型, 包括包装承载力、包装可靠性、包装成本、资源消耗、包装绿色性等5个优化目标, 使用组合隶属度函数构建评价指标集, 运用灰关联法与基于可能度排序算法的模糊层次分析法相结合的方法, 实现材料优选。**结果** 候选材料的关联系数分别为0.745、0.606、0.669、0.749。**结论** 关联程度最大的包装材料为最终优选包装材料。

关键词: 高压电器设备; 包装材料优选; 灰关联法; 三角模糊数; 层次分析法

中图分类号: TB484; TM564 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)01-0279-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.01.032

Selection of Packaging Materials for High-voltage Electrical Equipment

GAO Ling, WANG Pu, YI Peng

(Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

ABSTRACT: The work aims to realize the selection of packaging materials for high-voltage electrical equipment, improve the consistency and economy of packaging materials selection, and reduce manufacturing costs. A multi-objective material selection model including five optimization objectives such as packaging bearing capacity, packaging reliability, packaging cost, resource consumption and packaging greenness was established. The evaluation index set was constructed with the combined membership function, and the material selection was realized by combining the grey relational analysis (GRA) method with the fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) based on the possibility ranking algorithm. The correlation coefficients of candidate materials were 0.745, 0.606, 0.669 and 0.749. The packaging material with the largest correlation coefficient is the final preferred packaging material.

KEY WORDS: high-voltage electrical equipment; packaging material selection; grey relational analysis (GRA); triangular fuzzy number; fuzzy analytic hierarchy process (FAHP)

高压电器设备是关系国计民生的基础性设施设备, 一般安装在较为偏僻的地区, 具有体积大、质量大、运输困难等特点, 包装材料直接影响高压电器设备运输的可靠性和综合成本, 对产品顺利投入使用至关重要。在传统的包装设计中, 企业通常依靠经验进行包装材料的选择, 技术文件也依照经验进行编制, 但自身经验存在局限性, 随着新材料不断涌入, 还需考虑成本控制、绿色制造等多种因素, 以及各个影响因素的相互制约, 传统经验具有滞后性和片面性。电器设备包装材料的评价选择在行业间尚属空白, 因此

建立合适的包装材料选择评价体系, 综合各种影响因素, 选择最优的包装材料具有重要意义。

目前常用的多目标评价方法有模糊层次分析法^[1-3]、模糊评价法^[4-5]、优劣解距离法 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)^[6-8]等, 这些基于运筹学的评价方法考虑到了人评价事物时的模糊性, 在管理、机械等各个领域得到了广泛的应用, 这些评价方法通常使用权重排序确定最优方案, 忽视各个影响因素与最优解的关联程度, 其适用性有待提高。在基于模糊理论的评价体系中, 建立合适的隶属度函数

收稿日期: 2022-06-10

作者简介: 高岭 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为制造业信息化。

是应用模糊数学法的重要步骤。模糊统计法可以确定隶属度函数,但其统计周期长,要求数据量大,因此在工程上,常基于统计学,采用指派法确定隶属度^[9-12],包括正态型隶属度函数、梯形隶属度函数、Γ型隶属度函数等,上述的隶属度函数有不同的适用领域,高压电器包装材料的选择涉及影响因素众多,单一的隶属度函数显然不能满足要求。获得最优评价结果的关键是确定各个影响因素的权重,传统的求权重方法有很多,包括二项系数法^[13]、熵权法^[14]等,李强等^[15]提出了一种组合赋权法,在机床夹具的优选方面得到了应用,上述的权重计算方法采用单层次计算,并未考虑所有判断信息,具有一定的局限性。

高压电器设备包装材料的优选是一个多目标、多约束的复杂优化问题,文中在综合分析上述方法的优缺点的基础上,提出利用灰关联分析法和基于三角模糊数的层次分析法相结合的评价方法,根据不同的评价因素,采用组合隶属度函数,使用基于可能度的排序算法确定权重,实现对包装材料进行选择,并使用实例验证了该方法的有效性,这种方法准确、可靠,填补了高压电器领域包装材料选择的空白。

1 灰关联分析法和三角模糊数

1.1 灰色关联分析法

灰关联分析法(GRA)实质是以标准数列构成的曲线为依据,比较样本曲线与标准曲线的相似度,其核心是计算两者的关联程度^[16]。设包装材料优选问题中有 m 个评价指标 $E_1, E_2, \dots, E_m$,有 n 种候选方案,其基本步骤如下。

1) 建立评价指标矩阵。将评价指标无量纲化以后建立评价矩阵 E 为:

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & \cdots & e_{1m} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & \cdots & e_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & e_{n3} & \cdots & e_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: e_{ij} 为第 i 种方案的第 j 个评价指标的评价值, $i=1, 2, \dots, n$, $j=1, 2, \dots, m$ 。

2) 构造最优方案无量纲指标集。最优方案就是各个候选方案中的最符合要求的一种,方案中的指标按照不同的评价要求,取不同的值,最优方案指标集 e_0^* 为:

$$e_0^* = (e_{01}^*, e_{02}^*, e_{03}^*, \dots, e_{0m}^*) \quad (2)$$

3) 计算关联矩阵。根据式(1)、式(2)计算关联矩阵 ε 。

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} & \cdots & \varepsilon_{1m} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} & \cdots & \varepsilon_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_{n1} & \varepsilon_{n2} & \varepsilon_{n3} & \cdots & \varepsilon_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: ε_{ij} 为第 i 种材料的第 j 个评价指标的评价值相对于最优指标值的关联度,关联度表示候选方案与最优方案之间的联系的紧密程度,其计算方法为:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\Delta(\min) + \rho \Delta(\max)}{\Delta_{ij} + \rho \Delta(\max)} \quad (4)$$

式中: $\Delta_{ij} = |e_{ij} - e_{0j}^*|$, $i=(1, 2, \dots, n)$, $j=(1, 2, \dots, m)$, $\Delta(\min) = \min_i \min_j \Delta_{ij}$, $\Delta(\max) = \max_i \max_j \Delta_{ij}$; ρ 为分辨系数,取值范围为 $(0, 1)$, ρ 越小,各个方案之间的差异越大,取值通常为 $\rho=0.5$ 。

4) 计算关联系数矩阵。关联系数矩阵 r 的计算公式为:

$$r = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ \cdots \ r_n]^T = \varepsilon W \quad (5)$$

式中: $W = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ \cdots \ w_m]^T$, w_j 为第 j 个评价指标 E_j 的权重, $j=1, 2, 3, \dots, m$, 则方案包装材料中第 i 种方案的关联系数 r_i 为:

$$r_i = \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij} w_j, (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

最后通过对关联系数进行排序,可以选择出最优包装材料。

1.2 三角模糊数

若 $A = (l, m, u)$, 其中有 $0 \leq l \leq m \leq u$, 称 l 和 u 分别为 A 的上边界和下边界, m 为 A 的中间值, 称 A 为三角模糊数, 令区间 I_n 为:

$$I_n = u - l \quad (7)$$

若 I_n 值越大, 则评判越不清晰。

设判断矩阵 $A = (a_{ij})_{m \times m}$ ($i, j=1, 2, \dots, m$), 其中 $a_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ 是一个三角模糊数, 若 A 对于任意的 i 满足式(8)、式(9)的条件

$$a_{ii} = (l_{ii}, m_{ii}, u_{ii}) = (0.5, 0.5, 0.5) \quad \forall i \quad (8)$$

$$l_{ij} + u_{ji} = m_{ij} + m_{ji} = u_{ij} + l_{ji} = 1 \quad i \neq j, i, j=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

则称矩阵 A 为模糊互补判断矩阵。

2 包装材料优选模型的建立

2.1 包装材料优选综合评价指标体系的建立

对产品包装材料进行最优选择时, 应首先建立包装材料选择的评价体系, 目标层即为最优包装材料。在包装设计过程中, 材料的选择不仅要满足强度要求及经济性要求, 还要充分考虑其环保性和绿色性, 因此, 评价体系的优化指标层为承载力 B 、包装可靠性 S 、包装成本 C 、资源消耗 R 、环境影响 E 。每种材料有13个影响因素, 作为影响因素层, 共同构成了包装材料选择的层次分析模型, 见图1。

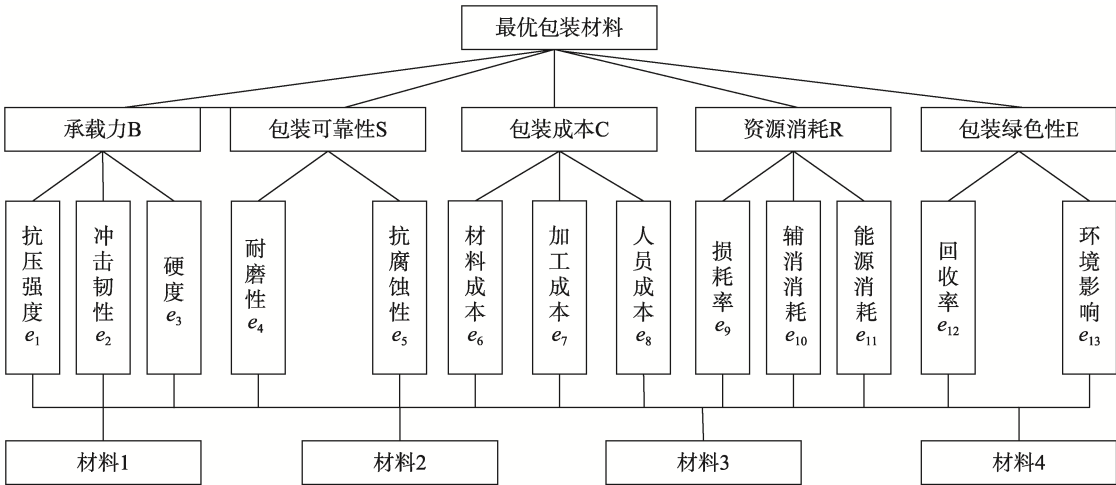


图 1 包装箱材料优选评价体系
Fig.1 Selection evaluation system of packaging material

2.2 无量纲评价指标集的确定

2.1 节共确定了 13 个影响因素, 各个影响因素单位不一致, 其中影响因素 e_4 、 e_5 、 e_{13} 为定性描述类因素, 无法直接比较。需要 13 个影响因素转换为无量纲的数值 d 进行比较。若采用单一的隶属度计算方法会导致评价的可信度降低, 对于不同的决策因素, 需采用不同的隶属度计算方法。

影响因素 e_1 、 e_2 、 e_3 为材料自身属性, 使用 Γ 型隶属度函数。按照我司的包装实际情况, 将材料的承载力分为一般、良好、优秀 3 个等级, 见表 1。

表 1 包装材料承载力等级划分
Tab.1 Classification of packaging material bearing capacity

等级	顺纹抗压强度/ MPa	硬度 (横切面) / MPa	冲击系数/ kPa
一般	≤ 25	≤ 17	≤ 10
良好	25~40	17~30	10~22
优秀	> 40	> 30	> 22

包装材料 i 影响因素 e_j 的隶属度 d_{ie_j} 的计算公式为:

$$d_{ie_j} = \begin{cases} 0 & x_j < c \\ 1 - e^{-k(x_j - c)} & x_j \geq c \end{cases} \quad (10)$$

式中: k 用来调节起始点切线斜率, 一般取 $2^{[17]}$; c 为评价值的下极限; x_j 为影响因素 e_j 的评价值, $j = 1, 2, 3$ 。

对于决策因素 e_4 、 e_5 、 e_{13} , 无法采用定量描述, 将因素 e_4 、 e_5 分为差、较差、一般、较好、好等 5 个指标; 对于 e_{13} 可分为严重、较严重、一般、轻微、无影响 5 个指标, 分别可用 1、2、3、4、5 这 5 个数字对应表示。决策因素 e_4 、 e_5 、 e_{13} 均属于越大越好的

指标, 因此采用偏大型柯西型隶属度函数, 设包装材料 i 影响因素 e_j 的隶属度 d_{ie_j} 满足 $d_{ie_j}(x_j = 5) = 1$, $d_{ie_j}(x_j = 3) = 0.75$, $d_{ie_j}(x_j = 1) = 0.01$, 可得隶属度 d_{ie_j} 计算公式为:

$$d_{ie_j} = \begin{cases} \frac{1}{1 + 1.5027(x_j - 0.8768)^{-2}} & 1 \leq x_j \leq 3 \\ 0.4894 \cdot \ln x_j + 0.2123 & 3 \leq x_j \leq 5 \end{cases} \quad (11)$$

式中: x_j 为影响因素 e_j 的评价值, $j = 4, 5, 13$ 。

设 v_{ie_j} 为第 $i(i = 1, 2, \dots, n)$ 种包装材料的影响因素 $e_j(j = 1, 2, \dots, 13)$ 的无量纲评价值, 其中影响因素 e_1 、 e_2 、 e_3 、 e_4 、 e_5 、 e_{12} 、 e_{13} 为越大越好型, 其余为越小越好型。为使无量纲评价指标集具有同一的表达形式, 对于越大越好型的影响因素, 采用计算式 (12) 进行统一化处理。

$$v_{ie_j} = \frac{d_{ie_j}}{\sum_{i=1}^n d_{ie_j}} \quad j = 1, 2, 3, 4, 5, 12, 13 \quad (12)$$

对于越小越好型的影响因素, 采用以下统一化计算公式:

$$v_{ie_j} = \frac{1}{d_{ie_j} \cdot \sum_{i=1}^n (d_{ie_j})^{-1}} \quad j = 6, 7, \dots, 11 \quad (13)$$

对于影响因素 e_6 、 e_7 、 $\dots$ 、 e_{12} , 根据其类型, 用式 (12)、式 (13) 计算其无量纲评价值, 其中 d_{ie_j} 为上述影响因素去单位后的评价值, $j = 6, 7, \dots, 12$ 。

2.3 包装材料优选评价指标权重的确定

模糊层次分析法 (FAHP) 是 20 世纪 70 年代首次提出的一种定性定量相结合的系统分析方法^[18], 该方法可量化评价指标, 能有效分析目标各层次之间的关系, 在各个领域得到广泛应用。通过基于三角模

糊数的层次分析法, 计算各影响因素权重。

FAHP 实现决策因素权重分配的步骤如下。

1) 构建模糊判断矩阵。候选包装材料的层次模型建成以后, 层级之间的联系就明确下来, 若某一层的下层有 m 个因素, 通过对 m 个因素的相互比较, 获得三角模糊互补判断矩阵 $A=(a_{ij})_{m \times m}$ $i, j=1, 2, \dots, m$, 其中 $a_{ij}=(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$, 为使模糊评价尺度得以量化, 引入适当的重要性指标对三角模糊数进行标度, 标度方法见表 2。

表 2 模糊标度值及其含义
Tab.2 Fuzzy scale values and their meanings

标度值	三角模糊数	含义
0.1	(0, 0.1, 0.2)	表示元素 i 和元素 j 相比, 元素 j 比元素 i 极端重要
0.3	(0.2, 0.3, 0.4)	表示元素 i 和元素 j 相比, 元素 j 比元素 i 明显重要
0.5	(0.4, 0.5, 0.6)	表示元素 i 和元素 j 相比, 元素 j 比元素 i 同等重要
0.7	(0.6, 0.7, 0.8)	表示元素 i 和元素 j 相比, 元素 i 比元素 j 明显重要
0.9	(0.8, 0.9, 1)	表示元素 i 和元素 j 相比, 元素 i 比元素 j 极端重要
0.2、0.4、...	相邻模糊数的中值	

2) 对模糊矩阵进行排序。基于三角模糊数的权重计算方法包括加性一致排序法^[19]、乘性一致性排序法^[20-22]、可能度排序方法^[23-24]等。文中使用改进的基于可能度的排序算法, 可以对不同影响因素进行反复比较, 最终确定一个能反应决策者整体判断的权重排序, 具体步骤如下。

根据步骤 1 建立的三角模糊互补判断矩阵 A , 计算每行的三角模糊数权重 s_i , 构建三角模糊权重矩阵 $S=[s_1 \ s_2 \ \dots \ s_m]^T$, s_i 为:

$$s_i = \left[\frac{\sum_{j=1}^m l_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m u_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^m m_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m m_{ij}}, \frac{\sum_{j=1}^m u_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m l_{ij}} \right] \quad i=0, 2, \dots, m \quad (14)$$

通过两两比较三角模糊数权重 s_i , 计算可能度 $p_{ij}=P(s_i > s_j), (i, j=1, 2, \dots, m)$, 构建判断矩阵 $P=(p_{ij})_{m \times m}$ $i, j=1, 2, \dots, m$ 。

$\varepsilon=$

0.815 9	0.333 3	0.600 3	0.737 1	1	0.869 4	0.893 6	0.741 6	0.723 3	0.475 8	0.781	1	0.910 4
0.369 3	1	0.421 2	0.514 2	0.561 1	0.600 5	1	1	1	0.914 1	0.700 4	0.706 7	1
0.397 2	0.415 8	0.379 4	1	0.942 8	0.760 3	0.865 5	0.816 9	0.763 3	1	0.906 7	0.783 3	0.936 9
1	0.471	1	0.486 9	0.486 2	1	0.925 4	0.721 4	0.705 6	0.540 7	1	0.673 9	0.847 1

$$p_{ij}=P(s_i \geq s_j)=$$

$$\lambda \max \left\{ 1 - \max \left\{ \frac{s_{jm} - s_{il}}{s_{im} - s_{il} + s_{jm} - s_{jl}}, 0 \right\}, 0 \right\} + \quad (15)$$

$$(1 - \lambda) \max \left\{ 1 - \max \left\{ \frac{s_{ju} - s_{im}}{s_{iu} - s_{im} + s_{ju} - s_{jm}}, 0 \right\}, 0 \right\}$$

式中: $i, j=0, 2, \dots, m$ 。

通过判断矩阵 P 可求得 m 个因素相对于对应上一层的权重 $W=[w_1 \ w_2 \ \dots \ w_m]^T$, W 中各元素可采用文献[25]中的公式计算:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^m p_{ij} + \frac{m}{2} - 1}{m(m-1)} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (16)$$

3) 计算总权重。设优化指标层有 n 个元素, 影响因素层有 z 个元素, 优化指标层元素 i 有 k 个影响因素, w_j^i 为元素 i 对应的影响因素 j 相对于元素 i 的权重, 则影响因素 j 相对于目标层的权重 w_j 为:

$$w_j = w_j^i w_i \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k \quad (17)$$

式中: w_i 为优化指标层元素 i 相对于目标层的权重。通过以上计算, 可得最终权重向量 W 为:

$$W=[w_1 \ w_2 \ \dots \ w_z]^T \quad (18)$$

通过以上过程, 利用 GRA 计算各个候选包装材料的关联系数, 通过 FAHP 计算各个影响因素相对于目标层的权重, 两者相结合, 最后比较关联系数的大小, 获得最优包装材料。

3 应用实例分析

将 FAHP 和 GRA 相结合的包装材料优选方法应用在实际案例中, 以证明方法的有效性。我司有一批待运输的高压电器设备, 其中某型号隔离开关质量约为 1 t, 有 4 种包装材料, 通过实验及查阅相关手册, 得到各个影响因素的值, 通过式 (10) — (13) 计算得到无量纲评价值, 结果见表 3。

利用无量纲评价值矩阵作为评价矩阵, 最优指标集为:

$$e_0^* = (0.366 \ 6, 0.403, 0.3742, 0.329 \ 6, 0.314 \ 2, 0.288 \ 2, 0.262, 0.282 \ 4, 0.287 \ 4, 0.319 \ 1, 0.277 \ 4, 0.289 \ 7, 0.261 \ 7)$$

根据式 (3)、式 (4) 可求得 $\Delta(\min)=0$; $\Delta(\max)=0.270 \ 3$, 计算得到关联矩阵 ε 为:

邀请设计、工艺、制造、一线包装人员及运输人员等 7 位专家, 通过专家的评判, 参照表 2 定义的模糊标度值, 对优化指标层进行重要度排序, 见表 4。

表 3 候选包装材料各影响因素的实验值及其隶属度
Tab.3 Experimental value and membership degree of each influencing factor of candidate packaging materials

影响因素	材料 M_1		材料 M_2		材料 M_3		材料 M_4	
	实验值	无量纲评价值	实验值	无量纲评价值	实验值	无量纲评价值	实验值	无量纲评价值
抗压强度 e_1/MPa	40.6	0.336 1	31.6	0.135 8	32.8	0.161 5	41.9	0.366 6
冲击系数 e_2/kPa	14.6	0.132 7	24.7	0.403	17.5	0.213 1	18.9	0.251 2
硬度 e_3/MPa	26.5	0.284 2	23.2	0.188 5	22	0.153 1	29.7	0.374 2
耐磨性 e_4	3.0	0.281 4	2.2	0.201 9	3.9	0.329 6	2.1	0.187 2
抗腐蚀性 e_5	4.2	0.314 2	2.4	0.208 5	4.0	0.306	2.1	0.171 4
材料成本 $e_6/\text{元}$	1 650	0.267 9	223 0	0.198 3	1 800	0.245 6	153 4	0.288 2
加工成本 $e_7/\text{元}$	98	0.245 9	92	0.262	100	0.241	96	0.251 1
人员成本 $e_8/\text{元}$	90	0.235 3	75	0.282 4	84	0.252 1	92	0.230 2
损耗率 $e_9/\%$	5	0.235 8	4.1	0.287 5	4.8	0.245 6	5.1	0.231 1
辅消消耗 e_{10}/kg	18	0.170 2	10	0.306 4	9.6	0.319 1	15	0.204 3
能源消耗 e_{11}/kW	2.2	0.239 5	2.4	0.219 6	2.0	0.263 5	1.9	0.277 4
回收率 $e_{12}/\%$	62	0.289 7	50	0.233 6	54	0.252 3	48	0.224 3
环境影响 e_{13}	3.6	0.248 4	3.3	0.261 7	3.5	0.252 6	3.9	0.237 3

表 4 优化指标层专家评价三角模糊矩阵
Tab.4 Expert evaluation on triangular fuzzy matrix of optimization index layer

指标	承载力 B	包装可靠性 S	包装成本 C	资源消耗 R	包装绿色性 E
承载力 B	(0.5,0.5,0.5)	(0.2,0.3,0.4)	(0.8,0.9,1.0)	(0.2,0.3,0.4)	(0.4,0.5,0.6)
		(0.6,0.7,0.8)	(0.6,0.7,0.8)	(0.6,0.7,0.8)	(0.6,0.7,0.8)
		(0.6,0.7,0.8)	(0.5,0.6,0.7)	(0.4,0.5,0.6)	(0.3,0.4,0.5)
		(0.6,0.7,0.8)	(0.7,0.8,0.9)	(0.6,0.7,0.8)	(0.7,0.8,0.9)
		(0.8,0.9,1.0)	(0.4,0.5,0.6)	(0.2,0.3,0.4)	(0.2,0.3,0.4)
		(0.8,0.9,1.0)	(0.4,0.5,0.6)	(0.4,0.5,0.6)	(0.4,0.5,0.6)
包装可靠性 S	(0.5,0.5,0.5)	(0.8,0.9,1.0)	(0.8,0.9,1.0)	(0.6,0.7,0.8)	(0.7,0.8,0.9)
		(0.6,0.7,0.8)	(0.1,0.2,0.3)	(0.4,0.5,0.6)	(0.4,0.5,0.6)
		(0.2,0.3,0.4)	(0.6,0.7,0.8)	(0.6,0.7,0.8)	(0.6,0.7,0.8)
		(0.2,0.3,0.4)	(0.6,0.7,0.8)	(0.6,0.7,0.8)	(0.7,0.8,0.9)
		(0.0,0.1,0.2)	(0.7,0.8,0.9)	(0.7,0.8,0.9)	(0.7,0.8,0.9)
		(0.0,0.1,0.2)	(0.6,0.7,0.8)	(0.6,0.7,0.8)	(0.4,0.5,0.6)
包装成本 C	(0.5,0.5,0.5)	(0.0,0.1,0.2)	(0.4,0.5,0.6)	(0.5,0.6,0.7)	(0.4,0.5,0.6)
		(0.0,0.1,0.2)	(0.8,0.9,1.0)	(0.6,0.7,0.8)	(0.7,0.8,0.9)
		(0.0,0.1,0.2)	(0.7,0.8,0.9)	(0.4,0.5,0.6)	(0.3,0.4,0.5)
		(0.2,0.3,0.4)	(0.6,0.7,0.8)	(0.6,0.7,0.8)	(0.6,0.7,0.8)
		(0.3,0.4,0.5)	(0.2,0.3,0.4)	(0.4,0.5,0.6)	(0.5,0.6,0.7)
		(0.1,0.2,0.3)	(0.1,0.2,0.3)	(0.7,0.8,0.9)	(0.7,0.8,0.9)
资源消耗 R	(0.5,0.5,0.5)	(0.4,0.5,0.6)	(0.2,0.3,0.4)	(0.4,0.5,0.6)	(0.4,0.5,0.6)
		(0.2,0.3,0.4)	(0.4,0.5,0.6)	(0.4,0.5,0.6)	(0.4,0.5,0.6)
		(0.4,0.5,0.6)	(0.2,0.3,0.4)	(0.4,0.5,0.6)	(0.4,0.5,0.6)
		(0.2,0.3,0.4)	(0.3,0.4,0.5)	(0.4,0.5,0.6)	(0.4,0.5,0.6)
		(0.6,0.7,0.8)	(0.2,0.3,0.4)	(0.4,0.5,0.6)	(0.4,0.5,0.6)
		(0.4,0.5,0.6)	(0.2,0.3,0.4)	(0.4,0.5,0.6)	(0.3,0.4,0.5)
包装绿色性 E	(0.5,0.5,0.5)	(0.2,0.3,0.4)	(0.2,0.3,0.4)	(0.2,0.3,0.4)	(0.7,0.8,0.9)
		(0.4,0.5,0.6)	(0.4,0.5,0.6)	(0.5,0.6,0.7)	(0.2,0.3,0.4)
		(0.2,0.3,0.4)	(0.5,0.6,0.7)	(0.6,0.7,0.8)	(0.8,0.9,1.0)
		(0.5,0.6,0.7)	(0.2,0.3,0.4)	(0.0,0.1,0.2)	(0.3,0.4,0.5)
		(0.1,0.2,0.3)	(0.1,0.2,0.3)	(0.5,0.6,0.7)	(0.6,0.7,0.8)
		(0.6,0.7,0.8)	(0.1,0.2,0.3)	(0.2,0.3,0.4)	(0.4,0.5,0.6)

其中 7 位专家的权重分别为 $\{0.17, 0.09, 0.12, 0.1, 0.13, 0.28, 0.11\}$, 通过加权平均获得模糊判断矩阵 A :

$A =$

$$\begin{bmatrix} (0.5, 0.5, 0.5) & (0.636, 0.736, 0.836) & (0.572, 0.672, 0.772) & (0.4, 0.5, 0.6) & (0.443, 0.543, 0.643) \\ (0.164, 0.264, 0.364) & (0.5, 0.5, 0.5) & (0.491, 0.591, 0.691) & (0.548, 0.648, 0.748) & (0.517, 0.617, 0.717) \\ (0.228, 0.328, 0.428) & (0.309, 0.409, 0.509) & (0.5, 0.5, 0.5) & (0.47, 0.57, 0.67) & (0.476, 0.576, 0.676) \\ (0.4, 0.5, 0.6) & (0.252, 0.352, 0.452) & (0.33, 0.43, 0.53) & (0.5, 0.5, 0.5) & (0.415, 0.515, 0.615) \\ (0.357, 0.457, 0.557) & (0.283, 0.383, 0.483) & (0.324, 0.424, 0.524) & (0.385, 0.485, 0.585) & (0.5, 0.5, 0.5) \end{bmatrix}$$

根据式 (14)、式 (15) 求得可能度判断矩阵 P :

$$P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.6957 & 0.8437 & 0.8985 & 0.9301 \\ 0.3043 & 0.5 & 0.6483 & 0.7033 & 0.735 \\ 0.1563 & 0.3517 & 0.5 & 0.5552 & 0.5869 \\ 0.1015 & 0.2967 & 0.4448 & 0.5 & 0.5317 \\ 0.0699 & 0.265 & 0.4131 & 0.4683 & 0.5 \end{bmatrix}$$

根据式 (16), 计算出优化指标 B、S、C、R、E 相对于目标层的权重 W_0 为:

$$W_0 = [0.4736 \quad 0.2782 \quad 0.13 \quad 0.0749 \quad 0.0433]^T$$

用同样的方法计算各影响因素的权重: e_1 、 e_2 、 e_3 相对于 B 的权重分别为 0.6646、0.2868、0.0486; e_4 、 e_5 相对于 S 的权重分别为 0.748、0.252; e_6 、 e_7 、 e_8 相对于 C 的权重分别为 0.6014、0.2979、0.1007; e_9 、 e_{10} 、 e_{11} 相对于 R 的权重分别为 0.4068、0.258、0.3352; e_{12} 、 e_{13} 相对于 E 的权重分别为 0.748、0.252。

由式 (17)、式 (18) 得到影响因素层相对于目标层的权重 W 为:

$$W = [0.3148 \quad 0.1358 \quad 0.023 \quad 0.2081 \quad 0.0701 \quad 0.0782 \quad 0.0387 \quad 0.0131 \quad 0.0305 \quad 0.0193 \quad 0.0251 \quad 0.0324 \quad 0.0109]^T$$

由式 (5)、式 (6) 可以求得各候选包装材料的综合关联程度为:

$$r = [0.745 \quad 0.606 \quad 0.669 \quad 0.749]^T$$

根据关联系数从大到小进行排序为材料 M_4 、材料 M_1 、材料 M_3 、材料 M_2 , 选取关联程度最大的包装材料为最终优选包装材料, 即包装材料 M_4 。

4 结语

高压电器设备包装材料的合理是保证产品运输可靠的重要前提, 文中综合分析了包装材料选择时各类影响因素, 建立了影响包装材料选择的层次分析模型, 包括 5 个优化目标和 13 个影响因素。建立了一种灰关联分析法和模糊层次分析法相结合的包装材料优选方法, 根据不同的影响因素特征, 采用组合隶属度计算方法, 克服了单一隶属度计算下的片面性; 在传统三角模糊互补判断矩阵评价方法的基础上, 进一步优化算法, 提出了基于可能度的权重计算方法, 使专家的判断更加合理, 并且降低主观因素的影响。通过实例验证, 可有效进行包装材料的选择, 证明了该方法的有效性。

参考文献:

- [1] 袁彪, 汪永超, 刘晓晨, 等. 基于模糊层次分析法的刀具材料选择[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(10): 130-133.
YUAN Biao, WANG Yong-chao, LIU Xiao-chen, et al. Tool Material Selection Based on FAHP[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016(10): 130-133.
- [2] NEHA, AGGARWAL A G, JAISWAL A, Multi-objective Release Time Problem for Modular Software Using Fuzzy Analytical Hierarchy Process[J]. Springer Series in Reliability Engineering, 2022, 1: 159-191.
- [3] 王伟贤, 孙舟, 潘鸣宇, 等. 基于模糊层次分析法的电动汽车充电桩信息安全风险评估方法[J]. 中国电力, 2021, 54(1): 96-103.
WANG Wei-xian, SUN Zhou, PAN Ming-yu, et al. Information Security Risk Assessment Method for Electric Vehicle Charging Piles Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. Electric Power, 2021, 54(1): 96-103.
- [4] 陈伟华, 吴坚, 裘榆涛, 等. 组合模糊综合评价法及其在输电网规划中的应用[J]. 浙江电力, 2020, 39(5): 100-106.
CHEN Wei-hua, WU Jian, QIU Yu-tao, et al. Combined Fuzzy Comprehensive Evaluation Method and Its Application in Transmission Network Planning[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(5): 100-106.
- [5] LI J, ZHANG H, WANG Z, et al, A Fuzzy Evaluation Method of Power Transformer Insulation Health State Based on Multi-weight Fusion[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2022, 1: 1-12.
- [6] 赵汝英, 张小飞, 郑珞琳. 基于 TOPSIS 的电力通信网关键节点识别方法研究[J]. 电工技术, 2020(22): 92-94.
ZHAO Ru-ying, ZHANG Xiao-fei, ZHENG Luo-lin. Research on Identification Method of Key Nodes in Power Communication Network Based on TOPSIS[J]. Electric Engineering, 2020(22): 92-94.
- [7] 荣飞, 毛灿, 周保荣, 等. 基于改进 TOPSIS 方法的柔性直流输电系统电压等级优选[J]. 高压电器, 2021, 57(5): 21-28.
RONG Fei, MAO Can, ZHOU Bao-rong, et al. Voltage Level Optimization of Flexible HVDC System Based on Improved TOPSIS Method[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 21-28.

- [8] BAFAIL O A, ABDULAAL R M. New Approach for Selecting a Suitable Recycling Collection Program for Recovered Paper and Pulp Recyclables Using AHP-TOPSIS Techniques[J]. Waste Management & Research: the Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA, 2021, 39(11): 1406-1413.
- [9] 李香飞. 基于不同隶属度函数的金属材料切削加工性模糊综合评价[J]. 工具技术, 2019, 53(4): 67-72.
LI Xiang-fei. Fuzzy Comprehensive Evaluation of Machinability for Metal Materials Based on Different Membership Functions[J]. Tool Engineering, 2019, 53(4): 67-72.
- [10] 刘蓉晖, 王毅超. 基于改进雷达图法与高斯隶属度相结合的电能质量综合等级评估[J]. 电测与仪表, 2018, 55(14): 69-74.
LIU Rong-hui, WANG Yi-chao. Comprehensive Grade Evaluation of Power Quality Based on Improved Radar Chart Method and Gaussian Membership Degree[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(14): 69-74.
- [11] 钱科军, 秦萌, 宋远军, 等. 基于模糊隶属度的充电站多目标优化调度[J]. 电力建设, 2020, 41(2): 118-124.
QIAN Ke-jun, QIN Meng, SONG Yuan-jun, et al. Multi-Objective Optimal Scheduling Based on Fuzzy Membership for Electric Bus Charging Station[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(2): 118-124.
- [12] KOSTEREY M, LITVINOV V. Development of Fuzzy Statistical Method of Optimal Resource Allocation Among Technical Departments of An Electric Utility Company[J]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016, 3(81): 20-27.
- [13] 覃柏英. FAHP的标度系统与排序方法研究[D]. 南宁: 广西大学, 2005: 13-16.
QIN Bo-ying. The Research of Scale System and Ranking Method of FAHP[D]. Nanning: Guangxi University, 2005: 13-16.
- [14] DONG Qing-yun, WANG Tie-gang. Research on The Green Manufacturing Tool Scheme Evaluation Model Based on The Combination of Entropy Weight And a TOPSIS Method[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(12): 94-99.
- [15] 李强, 汪永超, 李波, 等. 基于组合赋权法的GC-TOPSIS的机床夹具优选研究[J]. 制造技术与机床, 2020(5): 126-132.
LI Qiang, WANG Yong-chao, LI Bo, et al. Research on Optimal Selection of Machine Tool Fixture Based on Combination Weighting Method for GC-TOPSIS[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020(5): 126-132.
- [16] RAJYALAKSHMI M, RAO M V. Multi-Response Optimization of Machining Factors in Pocket Milling of AISI304 Using Grey Relational Analysis[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1112(1): 1-9.
- [17] 刘长银, 宋人杰, 赵萌, 等. 基于变权重和组合隶属度函数的GIS气体绝缘状态评估[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 102-106.
LIU Chang-yin, SONG Ren-jie, ZHAO Meng, et al. Gas Insulation State Assessment of GIS Equipment Based on Variable Weight and Combined Membership Function[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 102-106.
- [18] WANG Y, CHIN K. Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2011, 52(4): 541-553.
- [19] LIU W, CHANG J, MENG J, et al. Ranking Method of Additive Consistent Fuzzy Judgment Matrix Considering Scale[J]. System Engineering Theory and Practice, 2018, 38(7): 1836-1841.
- [20] 赵璇, 张强, 朱吉乔. 模糊数互补判断矩阵的乘性一致性检验及改进方法[J]. 运筹与管理, 2013, 22(3): 1-8.
ZHAO Xuan, ZHANG Qiang, ZHU Ji-qiao. Multiplicative Consistency Test and Modification Approach of Fuzzy Number Complementary Judgment Matrix[J]. Operations Research and Management Science, 2013, 22(3): 1-8.
- [21] 朱吉乔, 张强, 赵璇. 模糊数互补判断矩阵的乘性一致性研究[J]. 运筹与管理, 2013, 22(1): 29-35.
ZHU Ji-qiao, ZHANG Qiang, ZHAO Xuan. On the Multiplicative Consistency of Fuzzy Number Complementary Judgment Matrix[J]. Operations Research and Management Science, 2013, 22(1): 29-35.
- [22] 吕跃进, 蒋建军, 刘洪梅. 基于乘性模糊互补判断矩阵的FAHP[J]. 模糊系统与数学, 2012, 26(2): 98-104.
LYU Yue-jin, JIANG Jian-jun, LIU Hong-mei. FAHP Based on Multiplicative Consistency Fuzzy Complementary Judgment Matrix[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2012, 26(2): 98-104.
- [23] 甘庭聪, 徐义红, 张雨涵. 三角模糊数的一种排序方法[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(13): 116-121.
GAN Ting-cong, XU Yi-hong, ZHANG Yu-han. A Ranking Method of Fuzzy Triangular Fuzzy Numbers[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50(13): 116-121.
- [24] 甘庭聪. 三角模糊数的排序公式及应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2017: 14-17.
GAN Ting-cong. The Ranking Formula of Triangular Fuzzy Number and Its Applications[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017: 14-17.
- [25] 徐泽水. 三角模糊数互补判断矩阵的一种排序方法[J]. 模糊系统与数学, 2002, 16(1): 47-50.
XU Ze-shui. A Method for Priorities of Triangular Fuzzy Number Complementary Judgment Matrices[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2002, 16(1): 47-50.