

基于证据理论的产品包装方案综合成本测度

李联辉¹, 王宏光², 张立³

(1.北方民族大学, 银川 750021; 2.中船重工第七一三研究所, 郑州 450015;

3.耐帆包装工程(无锡)有限公司, 无锡 214028)

摘要: **目的** 研究不确定信息背景下产品包装方案的综合成本测度, 实现产品包装方案的优选。**方法** 对产品包装方案综合成本测度指标体系进行层次化建模; 采用隶属度的方法对测度指标的初始评分值进行规范化处理, 引入权重来实现对各测度指标重要程度的区分; 将备选包装方案视为辨识框架中的焦元, 计算各测度指标下所有焦元的加权基本概率分配值, 并进行两阶的 Dempster 合成, 最后基于信任区间进行备选包装方案综合成本的测度。**结果** 通过某小型电气控制柜包装方案综合成本测度的案例应用, 识别出最优的包装方案, 验证了所提出方法的有效性和可行性。**结论** 所提出方法能够为专家评分含有不确定信息时的产品包装方案综合成本测度提供了一种解决思路。

关键词: 包装方案; 综合成本; 不确定信息; 证据理论; 隶属度

中图分类号: TB488 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)17-0135-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.022

Comprehensive Cost Measurement of Product Packaging Alternatives Based on Theory of Evidence

LI Lian-hui¹, WANG Hong-guang², ZHANG Li³

(1.North Minzu University, Yinchuan 750021, China; 2.The 713th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450015, China; 3.NEFAB Packaging Engineering (Wuxi) Co., Ltd., Wuxi 214028, China)

ABSTRACT: The work aims to study the comprehensive cost measurement of product packaging alternative in the uncertain information environment and realize the optimization of product packaging alternative. The hierarchical model of the comprehensive cost measurement index system was established, and the membership degree method was applied to standardize the initial score value of measurement index. The weight was introduced to distinguish the importance of each measurement index. The packaging alternatives were considered as the focal elements in the identification framework, and the weighted basic probability assignment value of all focal elements under each measurement index was calculated for the two-order Dempster combination. Finally, the comprehensive cost of the packaging alternatives was measured based on the confidence interval. A case study of the comprehensive cost measurement of packaging alternatives of a small electrical cabinet was carried out and the optimal packaging alternative was identified, so that the feasibility and effectiveness of the proposed method were verified. The proposed method can provide a solution to the comprehensive cost measurement of product packaging alternatives with uncertain information on the expert scores.

KEY WORDS: packaging alternatives; comprehensive cost; uncertain information; theory of evidence; membership degree

综合成本是企业在进行包装方案优选时必须考虑的关键因素, 如何对备选包装方案的综合成本进行测度是一项复杂的系统工程, 需对多个环节进行统筹

评判^[1-2]。目前, 该方面的研究主要包括: 巩桂芬等^[3]运用模糊层次分析法对包装总成本进行了分析与评价, 使决策者能够对包装总成本进行定量分析; 汪春

收稿日期: 2017-12-21

基金项目: 宁夏自然科学基金(NZ17113); 宁夏高等学校一流学科(电子科学与技术)建设资助项目(NXYLXK2017A07)

作者简介: 李联辉(1986—), 男, 北方民族大学讲师, 主要研究方向为智能包装技术、知识工程等。

晖等^[4]采用作业成本法对包装成本进行实例计算和作业分析,找出了影响包装成本的主要因素及相应的解决方法,为包装成本管理提供了依据;宫运启^[5]通过知识引导策略和最相邻近策略相结合的检索方法,提出了利用相似实例的包装成本估算方法;郭彦峰等^[6]构建了缓冲包装件的评价体系和缓冲包装件的综合评价模型,给出了缓冲包装件整体性能与成本评价系统的基本构成与主要功能模块。分析上述研究可知,产品包装方案的综合成本测度本质上属于多属性决策问题^[7-9],其指标值一般通过专家考察后进行评分的方式来获取。然而,由于认知的局限性和经验的模糊性,相比于用确定性的分值评价某一事物,专家在评分时会不可避免地给出不确定性的信息,如区间型评分、空值型评分等。同时,决策者对各个指标的偏好程度不同,同一指标在不同应用环境下的重要程度也不一致,因此,在进行产品包装方案综合成本测度时,须对指标赋予合适的权重。

证据理论^[10-12]属于贝叶斯概率的推广,能够以不确定性信息为基础进行可信度推理。目前,该理论已在多个领域进行了成功应用^[13-18]。鉴于产品包装方案综合成本测度中专家评分的不确定性,文中基于上述分析,利用证据理论在处理不确定性信息方面的优势,提出一种基于证据理论的产品包装方案综合成本测度方法。首先建立产品包装方案综合成本测度的指标体系,基于隶属度实现对测度指标的初始评分值的规范化,并引入指标权重来区分指标的重要度,然后利用证据理论进行备选包装方案综合成本的测度。

1 产品包装方案综合成本测度指标体系的层次化建模

由于产品包装方案综合成本受到多种因素影响,因此在进行测度时需要根据测度指标所属类型,将其划分成不同层次^[3,19]。产品包装方案综合成本可通过包装物成本指标 ($I_{Material}$)、包装使用成本指标 (I_{Use}) 和包装流通成本指标 ($I_{Circulate}$) 来进行测度。其中,包装物成本指标可细分为包装物原料采购成本指标 ($I_{Purchase}$)、方案设计成本指标 (I_{Design}) 及制作加工成本指标 ($I_{Produce}$); 包装使用成本指标可细分为包装制品配送至客户端的运输成本指标 ($I_{Distribute}$)、现场打包成本指标 (I_{Pack}) 及库存管理成本指标 (I_{Stock}); 包装流通成本指标可细分为运输过程成本指标 ($I_{Transit}$)、装卸操作过程成本指标 ($I_{Stevadore}$) 及包装废弃物回收成本指标 ($I_{Recovery}$)。基于此,建立产品包装方案综合成本测度层次化指标体系的模型见图1。

产品包装方案综合成本测度指标体系可用集合 $I = \{I_{Material}, I_{Use}, I_{Circulate}\}$ 来表示,其中 $I_{Material} = \{I_{Purchase}, I_{Design}, I_{Produce}\}$, $I_{Use} = \{I_{Distribute}, I_{Pack}, I_{Stock}\}$, $I_{Circulate} = \{I_{Transit}, I_{Stevadore}, I_{Recovery}\}$ 。

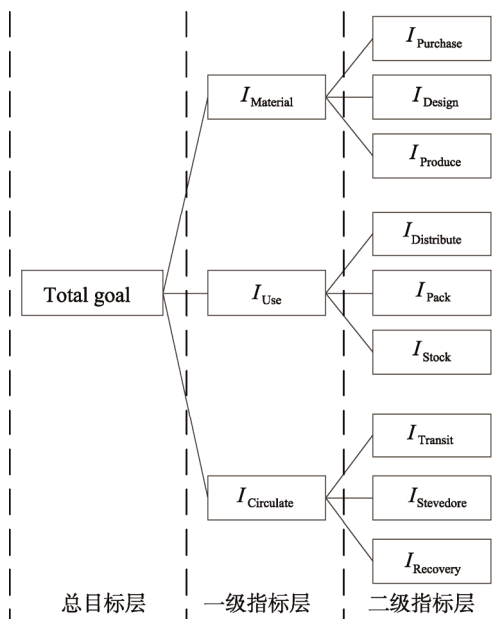


图1 产品包装方案综合成本测度指标体系的层次化模型
Fig.1 Hierarchical model of comprehensive cost measurement index system for product packaging alternative

2 采用证据理论进行产品包装方案综合成本测度

2.1 测度指标值的规范化处理与证据理论辨识框架的建立

由前文分析可知,产品包装方案综合成本测度的2级指标值分为点值型、区间值型和空值型,空值型指标值不需处理,该节将分别对点值型和区间值型指标值进行规范化处理以作为证据输入。对于各测度指标的初始值,设置5级评语: $\{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5\} = \{\text{很差, 差, 中等, 好, 很好}\}$ 。每个评语等级可进一步映射为作用值,依次为 $E_1=0.1, E_2=0.3, E_3=0.5, E_4=0.7, E_5=0.9$ 。在5级评语中, R_1 和 R_5 分别对应该测度指标的最低值 V_1 和最高值 V_5 , 则等价于评语集合 $\{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5\}$ 的指标值集合为 $\{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$ 。

设指标值对于评语等级 $R_j (j=1, 2, \dots, 5)$ 的隶属度为 λ_i , 其计算公式见文献[20]; 焦元 $A_k (k=1, 2, \dots, I, \text{这里 } I < 2^N)$ 在测度指标 q 上的指标值 $u_{k,q}$ 的规范化值为 $\hat{u}_{k,q}$, 规范化处理过程如下所述。

1) 点值型 ($u_{k,q}=a$)。若 $V_i \leq a \leq V_{i+1} (i=1, 2, \dots, 4)$, 有 $\hat{u}_{k,q} = \lambda_i E_i + \lambda_{i+1} E_{i+1}$ 。

2) 区间值型 ($u_{k,q}=[a, b]$)。若 $V_i \leq a < b \leq V_{i+1} (i=1, 2, \dots, 4)$, 有 $\hat{u}_{k,q} = \lambda_i E_i + \lambda_{i+1} E_{i+1}$ 。若 $V_i \leq a \leq V_{i+1}$ 且 $V_{i+1} \leq b \leq V_{i+2} (i=1, 2, \dots, 3)$, 有 $\hat{u}_{k,q} = \lambda_i E_i + \lambda_{i+1} E_{i+1} + \lambda_{i+2} E_{i+2}$ 。若 $V_i \leq a \leq V_{i+1}$ 且 $V_j \leq b \leq V_{j+1} V_j \leq b \leq V_{j+1} (i=1, 2, \dots, 4, j=1, 2, \dots, 4, i < j-1)$, 有 $\hat{u}_{k,q} = \lambda_i E_i + \lambda_{i+1} E_{i+1} +$

... + λ_jE_j + λ_{j+1}E_{j+1}。

根据证据理论^[7-9]，将产品包装方案综合成本测度问题中的备选包装方案的集合定义为辨识框架 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$ ， Θ 的幂集 2^Θ 构成命题集合。当 Θ 中元素的个数为 N 时，命题集合所代表的空间大小为 2^N 。证据理论中最基本的信息载体称为基本概率赋值 (BPA)，在辨识框架 Θ 上的 BPA 是一个 $2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 的函数 m ，称为 mass 函数，该函数满足条件 $m(\emptyset) = 0$ 和 $\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1$ 。这里， $m(A)$ 反映了证据对命题 A 的支持程度，其中使 $m(A) > 0$ 的 A 为焦点。对于 $\forall A \subseteq \Theta$ ，产品包装方案综合成本测度辨识框架 Θ 上有限个 BPA 函数 m_1, m_2, \dots, m_n 的 Dempster 合成规则为：

$$(m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n)(A) = \frac{\sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1)m_2(A_2)\dots m_n(A_n)}{K} \quad (1)$$

式中： $K = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n \neq \emptyset} m_1(A_1)m_2(A_2)\dots m_n(A_n) =$

$1 - \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \emptyset} m_1(A_1)m_2(A_2)\dots m_n(A_n)$ 为归一化常数。

在产品包装方案综合成本测度辨识框架 Θ 上，命题 A 的信度函数指的是 A 的所有子集的概率之和，即 $Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B)$ ；命题 A 的似然度函数指的是与 A 交集不为空的概率之和，即 $Pl(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B)$ 。

$Bel(A)$ 和 $Pl(A)$ 组成信任区间 $[Bel(A), Pl(A)]$ ，表示对命题 A 的确认程度。

对于产品包装方案综合成本测度问题，各测度指标在不同环境下的重要程度显然是不同的，可通过决策者对各测度指标的偏好程度体现出来，因此，文中引入权重来实现对各测度指标重要程度的区分，并求解不同测度指标下特殊焦点 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N\}$ 的 BPA 值，继而获取测度指标 q 下所有焦点 A_k (包括备选包装方案和 Θ) 的加权 BPA 值： $m'_q(A_k)$ 。设测度指标 q 的权重为 $x_q (0 < x_q < 1)$ (权重越大，则决策者对该指标的偏好程度越高)，对测度指标 q 下的所有焦点的 BPA 值进行以下加权标准化处理，即：当 $A_k \neq \Theta$ 时，

$$m'_q(A_k) = \chi_q \cdot \hat{u}_{k,q} / \sum_{k=1}^{l-1} \hat{u}_{k,q} ; \text{当 } A_k = \Theta \text{ 时, } m'_q(A_k) = 1 - x_q。$$

通过以上计算，可根据各备选包装方案的规范化指标值，得到所有焦点 A_k (包括备选包装方案和 Θ) 的加权 BPA 值。

2.2 产品包装方案综合成本测度流程

根据产品包装方案综合成本测度指标体系的层次化结构，采用 2 阶证据理论进行推算。产品包装方案综合成本测度的流程见图 2。

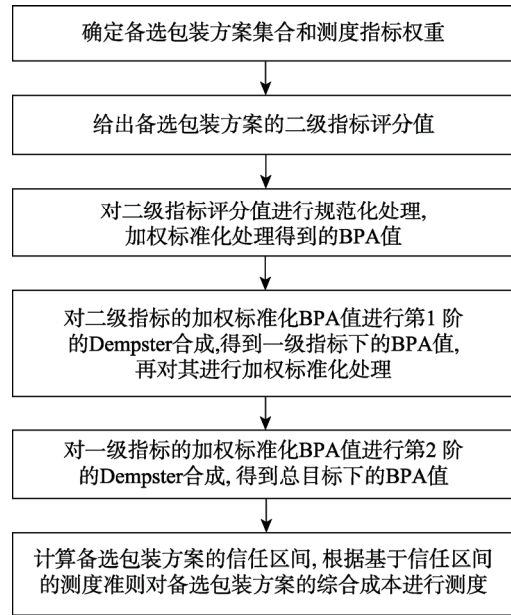


图 2 产品包装方案综合成本测度流程

Fig.2 Comprehensive cost measurement procedure of product packaging alternative

详细步骤如下所述。

1) 根据实际情况确定备选的产品包装方案集合，并根据决策者偏好确定各测度指标的权重。

2) 由包装领域的专家给出所有备选方案在 2 级指标上的评分值，评分越高代表在该指标上表现越好。其中，对能够完全确定的指标赋予点值，相对模糊的指标赋予区间值，完全未知的指标赋予空值。

3) 根据 2.1 节中方法，对 2 级指标的评分值进行规范化处理，进而对各 2 级指标下备选包装方案及 Θ 的 BPA 进行加权标准化处理。

4) 对于 1 级指标 $I_{Material}$ 下的 3 个 2 级指标 $I_{Purchase}$, I_{Design} , $I_{Produce}$ ，将备选包装方案及 Θ 的加权标准化 BPA 值 $m'_{Purchase}(A_k)$, $m'_{Design}(A_k)$, $m'_{Produce}(A_k)$ 作为证据并依据式 (1) 进行第 1 阶的 Dempster 合成，求得 1 级指标 $I_{Material}$ 下备选包装方案及 Θ 的 BPA 值 $m_{Material}(A_k)$ 。同理，对于 1 级指标 I_{Use} 下的 3 个 2 级指标 $I_{Distribute}$, I_{Pack} , I_{Stock} 和 1 级指标 $I_{Circulate}$ 下的 3 个 2 级指标 $I_{Transit}$, $I_{Stevadore}$, $I_{Recovery}$ ，进行同样的推算，分别求得 1 级指标 I_{Use} 和 $I_{Circulate}$ 下备选包装方案及 Θ 的 BPA 值 $m_{Use}(A_k)$, $m_{Circulate}(A_k)$ 。

5) 对 1 级指标 $I_{Material}$ 下备选包装方案及 Θ 的 BPA 值 $m_{Material}(A_k)$ 进行加权标准化处理，求得加权标准化 BPA 值 $m'_{Material}(A_k)$ ，这里将第 1 阶 Dempster 合成产生的焦点 Θ 的 BPA 值 $m_{Material}(\Theta)$ 视为非 Θ 焦点的 BPA 值，即 $m_{Material}(\Theta) = m_{Material}(A_l)$ 。

那么，当 $A_k \neq \Theta$ 时，有：

$$m'_{Material}(A_k) = \chi_{Material} \frac{m_{Material}(A_k)}{\sum_{k=1}^l m_{Material}(A_k)} \quad (2)$$

当 $A_k = \emptyset$ 时, 有:

$$m'_{Material}(A_k) = 1 - \chi_{Material} + m'_{Material}(A_l) \quad (3)$$

同理, 分别对 I_{Use} 和 $I_{Circulate}$ 下的备选包装方案及 \emptyset 的 BPA 值 $m_{Use}(A_k)$ 和 $m_{Circulate}(A_k)$ 进行同样处理, 分别求得加权标准化 BPA 值 $m'_{Use}(A_k)$ 和 $m'_{Circulate}(A_k)$ 。

6) 将 1 级指标 $I_{Material}$, I_{Use} 和 $I_{Circulate}$ 的加权标准化 BPA 值 $m'_{Material}(A_k)$, $m'_{Use}(A_k)$ 和 $m'_{Circulate}(A_k)$ 作为证据并依据式 (1) 进行第 2 阶的 Dempster 合成, 求得总目标下各备选包装方案的 BPA 值 $m'_{Total}(A_k)$ 。

7) 根据 2.1 节中的方法, 分别计算所有备选包装方案的信度函数值 $Bel(A_k)$ 和似然度函数值 $Pl(A_k)$, 然后得到相应的信任区间 $[Bel(A_k), Pl(A_k)]$ 。

8) 采用以下的测度准则, 对备选包装方案的综合成本进行测度。设备选包装方案 A_k 和 A_g 的信任区间分别为 $[Bel(A_k), Pl(A_k)]$ 和 $[Bel(A_g), Pl(A_g)]$, A_k 优于 A_g 的程度 $\Delta_{k,g}$ 可通过 A_k 和 A_g 的信任区间进行推算, 即:

$$\Delta_{k,g} = \frac{\max\{0, Pl(A_k) - Bel(A_g)\} - \max\{0, Bel(A_k) - Pl(A_g)\}}{Pl(A_k) - Bel(A_k) + Pl(A_g) - Bel(A_g)} \quad (4)$$

这里 $0 \leq \Delta_{k,g} \leq 1$, 于是可得备选包装方案优劣程度两两对比矩阵 Δ 。若 $\Delta_{k,g} > 0.5$, 则 A_k 优于 A_g ; 若 $\Delta_{k,g} < 0.5$, 则 A_k 劣于 A_g ; 若 $\Delta_{k,g} = 0.5$, 则 A_k 的 A_g 的优劣程度相同。对于 3 个备选包装方案 A_k, A_g 和 A_h , 若 $\Delta_{k,g} > 0.5$ 且 $\Delta_{g,h} > 0.5$, 则 A_k 优于 A_h 。

3 案例应用

某家小型电气控制柜制造企业的备选包装方案包括胶合板箱包装、瓦楞纸箱包装、蜂窝纸箱包装、中空板箱包装、胶合板-蜂窝纸结合包装及胶合板-瓦楞纸结合包装等 6 种包装方案, 依次用 A_1, A_2, \dots, A_6 表示。该节将应用所提出的方法对这 6 种备选包装方案的综合成本进行测度。决策者赋予各测度指标的权重, 1 级指标: $\chi_{Material}=0.95, \chi_{Use}=0.85, \chi_{Circulate}=0.75$, 也可归一化表示为 $0.95/2.55, 0.85/2.55, 0.75/2.55$ 。2 级指标: $\chi_{Purchase}=0.90, \chi_{Design}=0.85, \chi_{Produce}=0.70$, 也可归一化表示为 $0.90/2.45, 0.85/2.45, 0.70/2.45$; $\chi_{Distribute}=0.85, \chi_{Pack}=0.95, \chi_{Stock}=0.90$, 也可归一化表示为 $0.85/2.70, 0.95/2.70, 0.90/2.70$; $\chi_{Transit}=0.75, \chi_{Stevodore}=0.85, \chi_{Recovery}=0.80$, 也可归一化表示为 $0.75/2.40, 0.85/2.40, 0.80/2.40$ 。

首先由多位专家对该企业及其所处市场环境的实际情况进行考察, 在此基础上对上述 6 种备选包装方案进行评分 (满分为 1), 最后给出的评分值见表 1。

以指标 $I_{Purchase}$ 为例, 5 级评语集合 $\{R_1, R_2, R_3, R_4, R_5\}$ 在该指标上对应的指标值集合为 $\{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{0.45, 0.57, 0.69, 0.81, 0.93\}$, A_1 在该指标上的指标值 0.61 介于 V_2 和 V_3 之间, 依据式 (2) 可算得其规范化值为 $\hat{u}_{1,Purchase} = 0.3667$ 。同理, 依据式 (2—5) 算得其他指标值的规范化值, 见表 2。

表 1 备选包装方案在 2 级指标上的评分值

Tab.1 Rating values on the two-level index of packaging alternatives

备选包装方案	$I_{Material}$			I_{Use}			$I_{Circulate}$		
	$I_{Purchase}$	I_{Design}	$I_{Produce}$	$I_{Distribute}$	I_{Pack}	I_{Stock}	$I_{Transit}$	$I_{Stevodore}$	$I_{Recovery}$
A_1	0.61	0.82	0.74	0.78	0.85	0.82	—	0.86	0.66
A_2	0.86	0.73	[0.76, 0.85]	0.70	—	0.62	0.60	0.63	0.87
A_3	0.93	—	[0.54, 0.68]	0.72	0.73	0.75	[0.70, 0.80]	0.78	0.92
A_4	0.55	0.55	0.66	0.88	0.48	0.86	0.55	0.85	0.60
A_5	0.74	0.70	0.78	0.35	0.52	0.70	0.42	0.56	0.75
A_6	0.45	0.88	[0.80, 0.88]	0.46	0.83	0.75	0.38	0.88	0.80

表 2 备选包装方案评分值的规范化值

Tab.2 Normalization of rating values for packaging alternatives

备选包装方案	$I_{Material}$			I_{Use}			$I_{Circulate}$		
	$I_{Purchase}$	I_{Design}	$I_{Produce}$	$I_{Distribute}$	I_{Pack}	I_{Stock}	$I_{Transit}$	$I_{Stevodore}$	$I_{Recovery}$
A_1	0.3667	0.7545	0.5706	0.7491	0.9000	0.7667	—	0.8500	0.2500
A_2	0.7833	0.5364	0.7235	0.6283	—	0.1000	0.5190	0.2750	0.7750
A_3	0.9000	—	0.2978	0.6585	0.6405	0.5333	0.8048	0.6500	0.9000
A_4	0.2667	0.1000	0.3824	0.9000	0.1000	0.9000	0.4238	0.8250	0.1000
A_5	0.5833	0.4636	0.6647	0.1000	0.1865	0.3667	0.1762	0.1000	0.4750
A_6	0.1000	0.9000	0.8059	0.2660	0.8568	0.5333	0.1000	0.9000	0.6000

根据表 2 中数据以及各 2 级测度指标的权重, 计算每个 2 级指标下各焦元 (备选包装方案及 \emptyset) 的加

权标准化 BPA 值，见表 3。

根据表 3 中的数据，依据式 (1) 进行第 1 阶的

Dempster 合成，求得 1 级指标 $I_{Material}$, I_{Use} 和 $I_{Circulate}$ 下各焦元 (备选包装方案及 θ) 的 BPA 值，见表 4。

表 3 2 级指标下各焦元的加权标准化 BPA 值
Tab.3 Weighted and normalized BPA values of all the focal elements under the two-level index

焦元	$m'_{Purchase}(A_k)$	$m'_{Design}(A_k)$	$m'_{Produce}(A_k)$	$m'_{Distribute}(A_k)$	$m'_{Pack}(A_k)$	$m'_{Stock}(A_k)$	$m'_{Transit}(A_k)$	$m'_{Stevadore}(A_k)$	$m'_{Recovery}(A_k)$
A_1	0.1100	0.2328	0.1159	0.1928	0.3186	0.2156	—	0.2007	0.0645
A_2	0.2350	0.1655	0.1470	0.1617	—	0.0281	0.1923	0.0649	0.2000
A_3	0.2700	—	0.0605	0.1695	0.2267	0.1500	0.2983	0.1535	0.2323
A_4	0.0800	0.0309	0.0777	0.2317	0.0354	0.2531	0.1571	0.1948	0.0258
A_5	0.1750	0.1431	0.1351	0.0257	0.0660	0.1031	0.0653	0.0236	0.1226
A_6	0.0300	0.2777	0.1638	0.0685	0.3033	0.1500	0.0371	0.2125	0.1548
θ	0.1000	0.1500	0.3000	0.1500	0.0500	0.1000	0.2500	0.1500	0.2000

表 4 1 级指标下各焦元的 BPA 值
Tab.4 BPA values of all the focal elements under one-level index

焦元	$m_{Material}(A_k)$	$m_{Use}(A_k)$	$m_{Circulate}(A_k)$
A_1	0.2170	0.4592	0.0407
A_2	0.3554	0.0033	0.1763
A_3	0.0348	0.2310	0.4923
A_4	0.0299	0.1037	0.1105
A_5	0.2328	0.0217	0.0305
A_6	0.1301	0.1812	0.1496
θ	0.0640	0.0108	0.0944

分别对 1 级指标 $I_{Material}$, I_{Use} 和 $I_{Circulate}$ 下各焦元 (备选包装方案及 θ) 的 BPA 值进行加权标准化处理，得到其加权标准化 BPA 值，见表 5。

表 5 1 级指标下各焦元的加权标准化 BPA 值
Tab.5 Weighted and normalized BPA values of all the focal elements under the one-level index

焦元	$m'_{Material}(A_k)$	$m'_{Use}(A_k)$	$m'_{Circulate}(A_k)$
A_1	0.1938	0.3861	0.0279
A_2	0.3173	0.0028	0.1208
A_3	0.0311	0.1942	0.3374
A_4	0.0267	0.0872	0.0757
A_5	0.2079	0.0182	0.0209
A_6	0.1162	0.1524	0.1025
θ	0.1071	0.1591	0.3147

根据表 5 中的数据，依据式 (1) 进行第 2 阶的 Dempster 合成，求得总目标下各备选包装方案及 θ 的 BPA 值为： $m_{Total}(A_1)=0.4482$, $m_{Total}(A_2)=0.1057$, $m_{Total}(A_3)=0.2047$, $m_{Total}(A_4)=0.0314$, $m_{Total}(A_5)=0.0324$, $m_{Total}(A_6)=0.1776$, $m_{Total}(\theta)=0.0869$ 。分别计算所有备选包装方案的信度函数值 $Bel(A_k)$ 和似然度函数值 $Pl(A_k)$ ，然后得到相应的信任区间 $[Bel(A_k), Pl(A_k)]$ ，见表 6。

表 6 各备选包装方案的信度函数值、似然度函数值及信任区间

备选包装方案	$Bel(A_k)$	$Pl(A_k)$	$[Bel(A_k), Pl(A_k)]$
A_1	0.4482	0.5351	[0.4482, 0.5351]
A_2	0.1057	0.1926	[0.1057, 0.1926]
A_3	0.2047	0.2916	[0.2047, 0.2916]
A_4	0.0314	0.1183	[0.0314, 0.1183]
A_5	0.0324	0.1193	[0.0324, 0.1193]
A_6	0.1776	0.2645	[0.1776, 0.2645]

基于式 (4) 所示的测度准则，可得备选包装方案优劣程度两两对比矩阵 Δ 为：

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ & 0.5 & 0 & 0.9275 & 0.9217 & 0.0863 \\ & & 0.5 & 1 & 1 & 0.6559 \\ & & & 0.5 & 0.4942 & 0 \\ & & & & 0.5 & 0 \\ & & & & & 0.5 \end{bmatrix}$$

依据矩阵 Δ 进行备选包装方案综合成本的测度，排序结果为： $A_1, A_3, A_6, A_2, A_5, A_4$ ，即 A_1 (胶合板箱包装) 最优， A_3 (蜂窝纸箱包装)、 A_6 (胶合板-瓦楞纸结合包装)、 A_2 (瓦楞纸箱包装)、 A_5 (胶合板-蜂窝纸结合包装) 依次次之， A_4 (中空板箱包装) 最劣。

为验证文中方法的有效性，将此方法与经典 TOPSIS 法^[8,21]进行比较。针对表 1 中备选包装方案的初始评分值，去除含有空值的指标，用区间中值来替换区间型评分值，经加权处理后采用经典 TOPSIS 法进行 6 种备选包装方案综合成本的测度，排序结果为： $A_1, A_3, A_2, A_6, A_5, A_4$ 。可见，文中方法与经典 TOPSIS 法的整体排序趋势是一致的，均认为 A_1 最优、 A_4 最劣，仅在 A_2, A_6 的判定上存在不同。这是由于经典 TOPSIS 法无法处理指标值相对模，甚至完全未知

等信息不确定的情况引起的,而证据理论能将不确定的信息进行可行的转换,通过合成多个证据解决信息不确定背景下的测度问题。

4 结语

综合成本测度是包装方案优选的关键步骤。为解决综合成本测度时专家评分的不确定性和指标偏好程度不同的问题,文中利用证据理论能够基于不确定性信息进行可信度推理的特点,提出了一种基于证据理论的产品包装方案综合成本测度方法,并通过某小型电气控制柜包装方案综合成本测度的应用案例,证明了所提出方法的有效性和可行性,从而为不确定信息背景下的产品包装方案综合成本测度提供了一种解决思路。

参考文献:

- [1] 徐锋,纪杨建,祁国宁,等. 基于低碳与成本约束的机电产品包装概念设计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(10): 199—205.
XU Feng, JI Yang-jian, QI Guo-ning, et al. Packaging Conceptual Design of Mechanical and Electrical Products Based on Low-carbon and Cost Constraint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(10): 199—205.
- [2] 王世君,王世民. 快递包装标准化成本收益分析[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2015, 32(9): 93—97.
WANG Shi-jun, WANG Shi-min. Analysis of the Express Packaging Standardization Cost-income[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2015, 32(9): 93—97.
- [3] 巩桂芬,兰明,殷科. 包装总成本综合评价 AHP 模型研究[J]. 包装工程, 2013, 34(3): 100—103.
GONG Gui-fen, LAN Ming, YIN Ke. Research on Comprehensive Evaluation AHP Model of Total Packaging Cost[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(3): 100—103.
- [4] 汪春晖,朱霞,马武彪. 作业成本法在包装成本管理中的应用[J]. 后勤工程学院学报, 2007, 23(1): 112—113.
WANG Chun-hui, ZHU Xia, MA Wu-biao. Application of ABC to Package Cost Management[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2007, 23(1): 112—113.
- [5] 宫运启. 基于实例推理的产品包装成本估算研究[J]. 包装工程, 2012, 33(15): 64—67.
GONG Yun-qi. Research on Packaging Cost Estimation of Product Based on CBR[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15): 64—67.
- [6] 郭彦峰,王宏涛,付云岗,等. 缓冲包装件整体性能与成本评价系统的研究[J]. 包装工程, 2007, 28(11): 78—80.
GUO Yan-feng, WANG Hong-tao, FU Yun-gang, et al. Research on Unitary Performance and Cost Evaluation System of Cushioned Package[J]. Packaging Engineering, 2007, 28(11): 78—80.
- [7] 张英俊,马培军,苏小红,等. 属性权重不确定条件下的区间直觉模糊多属性决策[J]. 自动化学报, 2012, 38(2): 220—228.
ZHANG Ying-jun, MA Pei-jun, SU Xiao-hong, et al. Multi-attribute Decision Making with Uncertain Attribute Weight Information in the Framework of Interval-valued Intuitionistic Fuzzy Set[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(2): 220—228.
- [8] 李联辉,莫蓉,常智勇,等. 基于平衡权重和改进 TOPSIS 的航空发动机装配任务优先度评价方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(5): 1193—1201.
LI Lian-hui, MO Rong, CHANG Zhi-yong, et al. Priority Evaluation Method for Aero-engine Assembly Task Based on Balanced Weight and Improved TOPSIS[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(5): 1193—1201.
- [9] 李玉鹏,连晓振,卢成,等. 基于混合模糊多属性决策的复杂产品模块划分方案评价[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(11): 1374—1382.
LI Yu-peng, LIAN Xiao-zhen, LU Cheng, et al. Evaluation Approach to Rank Module Partition Schemes of Complex Products Based on Hybrid Fuzzy Multi-attribute Decision Making[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(11): 1374—1382.
- [10] DEMPSTER A P. Upper and Lower Probabilities Induced by a Multi-valued Mapping[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38(2): 325—339.
- [11] DEMPSTER A P. A Generalization of Bayesian Inference[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1968, 30(2): 205—247.
- [12] SHAFER G. A Mathematical Theory of Evidence[M]. Princeton: Princeton University Press, 1976.
- [13] 孙越林,包磊. 基于 D-S 证据理论的海战场目标战术意图识别技术研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(5): 48—51.
SUN Yue-lin, BAO Lei. Study on Recognition Technique of Targets' Tactical Intentions in Sea Battlefield Based on D-S Evidence Theory[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(5): 48—51.
- [14] 李珂,杨杨,邱雪松. 城市汽车导航中一种改进的 D-S 证据理论地图匹配算法[J]. 测绘学报, 2014(2): 208—213.
LI Ke, YANG Yang, QIU Xue-song. An Improved Map Matching Algorithm Based on D-S Evidence Theory in City Vehicle Navigation[J]. Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica, 2014(2): 208—213.
- [15] 鞠彦兵,冯允成,姚李刚. 基于证据理论的软件开发风险评估方法[J]. 系统管理学报, 2003, 12(3): 218—223.

- JU Yan-bing, FENG Yun-cheng, YAO Li-gang. Research on the Measure of Risk in the Course of Software Development[J]. *Systems Engineering-theory Methodology Application*, 2003, 12(3): 218—223.
- [16] 郑霞忠, 石法起, 陈述, 等. 基于 D-S 证据理论的地下洞室作业人员安全行为评价[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(6): 158—162.
- ZHENG Xia-zhong, SHI Fa-qi, CHEN Shu, et al. Evaluation on Safety Behavior of Workers in Underground Cavern Based on D-S Evidence Theory[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(6): 158—162.
- [17] YU J, HU M, WANG P. Evaluation and Reliability Analysis of Network Security Risk Factors Based on D-S Evidence Theory[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2018, 34(2): 861—869.
- [18] YAN J, XIE Z, CHEN K, et al. Air Traffic Management System Safety Evaluation Based on Grey Evidence Theory[J]. *Journal of Grey System*, 2015, 27(3): 23—38.
- [19] 戴宏民, 戴佩华. 产品整体包装解决方案策划(设计)的目标、原则及方法[J]. *重庆工商大学学报(自然科学版)*, 2010, 27(1): 80—84.
- DAI Hong-min, DAI Pei-hua. Objective, Principle and Methods for Holistic Product Package Solution Plan Design[J]. *Journal of Chongqing Technology & Business University*, 2010, 27(1): 80—84.
- [20] GONG B, HUA Z. The Evidential Reasoning Approach for Multi-attribute Decision Making Problem with Incomplete Decision Matrix[C]// *International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, IEEE Computer Society, 2007: 416—421.
- [21] LIU F, ZHANG W G. TOPSIS-based Consensus Model for Group Decision-making with Incomplete Interval Fuzzy Preference Relations[J]. *IEEE Trans Cybern*, 2017, 44(8): 1283—1294.