

基于区间层次分析法和隶属度的食品灌装机 设计方案评价

Evaluation of food filling machine design scheme based on interval
analytic hierarchy process and membership degree

侍红岩¹

郑淑贤²

SHI Hong-yan¹ ZHENG Shu-xian²

(1. 内蒙古民族大学机械工程学院, 内蒙古 通辽 028043; 2. 天津大学机械工程学院, 天津 300000)

(1. College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University for the Nationalities, Tongliao, Inner Mongolia 028043, China; 2. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

摘要:针对食品灌装机设计方案评价问题的不确定性,提出一种新的食品灌装机设计方案评价方法。建立食品灌装机设计方案评价指标体系,提出食品灌装机设计方案评价优劣等级和区间数等级,利用区间层次分析法确定食品灌装机设计方案评价指标的区间数权重;构建了基于区间层次分析法和隶属度的食品灌装机设计方案评价模型;结合评价实例对一款多用途辣椒料自动灌装设备设计方案进行了评价,验证了该评价模型的合理性和有效性。

关键词:食品机械;方案评价;区间层次分析法;隶属度

Abstract: In view of the uncertainty in the evaluation of the design of food filling machine, a new evaluation method for the design of food filling machine was proposed. Firstly, the evaluation index system of the design scheme of the food filling machine was set up, and the grade of the design scheme evaluation and the interval number of the food filling machine were put forward. Moreover, the interval number weight of the evaluation index of the design scheme of the food filling machine was determined by the interval analytic hierarchy process. Furthermore, an evaluation model of food filling machine design scheme based on interval analytic hierarchy process and membership degree was constructed. Finally, an evaluation example was used to evaluate the design scheme of a multi-purpose chili filling automatic filling equipment, which verifies the rationality and validity of the evaluation model.

Keywords: food machinery; scheme evaluation; IAHP; degree of membership

基金项目: 2018 年内蒙古自治区科技创新引导项目(编号: KCBJ2018028)

作者简介: 侍红岩(1979—),女,内蒙古民族大学讲师,博士。

E-mail: shyimun@163.com

收稿日期: 2018-03-12

随着食品深加工行业的迅猛发展,食品灌装机械的竞争日趋激烈,设计开发多功能、高效率、低消耗的食品灌装机械成为食品机械行业竞相发展的目标。食品灌装机械设计方案评价是优选改进设计方案、助推企业提高生产效益的关键。目前,已有一些学者开展了关于机械产品评价的研究。张肖等^[1-2]提出了基于 TRIZ 的印刷机械创新设计方案评价体系;田启华等^[3]基于信息公理和模糊数学对机械设计方案进行了评价研究;焦玉民等^[4]采用模糊层次分析法对工程机械质量评价问题进行了研究;宾光富等^[5]利用模糊层次分析法开展了机械设备多特征参数健康状态评价研究;刘静等^[6]分析贝叶斯网络的特点,综述其在食源性微生物定量风险评估中的应用;张建辉等^[7]采用概率评估法对白酒中的 2 种邻苯二甲酸酯类[邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯]的膳食暴露进行风险评估;黄己立等^[8]设计了“有导师”型数据输入的基于改进的 BP 神经网络,以及“无导师”型数据输入的自组织竞争神经网络评价模型及算法;杨涛^[9]提出了一种首先基于客户对各设计方案的需求偏好信息,利用图论工具对无向图连通子图的输出完成需求偏好相似客户的聚类;其次考虑到产品设计成本与客户满意度之间的矛盾,通过建立客户聚类评价准则确定最佳聚类结果;然后结合优势数分析的方案评价排序方法。从公开发表的文献看,对于食品机械设计方案评价的研究较少,仅见任甲举等^[10]采用改进的模糊层次分析法对食品灌装机设计方案评价进行了研究。文献[10]采用层次分析法确定评价指标的权重,没有充分考虑指标权重的不确定性和定性评价指标的区间性。在采用主观方法确定指标的权重过程中,由于专家经验阅历、能力水平和知识结构的差异性,专家给出的指标权重往往不是固定的常数,而是一个区间数。同理,定性指标也

很难量化为一个具体的数值。通常情况下,用区间数来表示指标的权重和定性评价指标将会更加符合评价实践。本研究拟采用区间层次分析法和隶属度对食品灌装机设计方案评价问题进行研究,以期为衡量食品灌装机设计方案优劣、改进优化设计方案提供更加科学的决策依据,同时为其它食品机械设计方案评价问题提供新的思路和解决方案。

1 构建食品灌装机设计方案评价指标体系

建立客观、合理的评价指标体系是成功开展食品灌装机设计方案评价的基础和前提。在选取评价指标时应遵循全面性、一致性、独立性、协调性和可操作性等原则,被选取的指标不仅要具有代表性还能够反映食品灌装机某一方面的属性。影响食品灌装机设计方案优劣的因素是多方面的,需要构建多维多层次的评价指标体系。食品灌装机属于食品机械,衡量其设计方案优劣不仅要从功能维度进行考虑(如操作性、精度、调节性和维修性等因素),还要从食品安全角度(如灌装机材料无毒性和、是否容易清洁、抗异物侵入能力等)、经济性角度(如运行费用和材料费用等)和环境污染角度(如油液污染、噪声污染、废弃物污染等)进行考虑。基于上述分析,本文从功能属性、安全属性、经济属性和环境属性 4 个维度出发,构建如图 1 所示的多层次食品灌装机设计方案评价指标体系。

进行食品灌装机设计方案评价,将方案优劣等级划分为 5 个:1 级(好)、2 级(较好)、3 级(一般)、4 级(较差)、5 级(差),为了适于区间层次分析法评价食品灌装机设计方案,需要对方案优劣等级进行量化,这里采用区间数方法进行量化,好、较好、一般、较差和差 5 个优劣等级对应的区间数分别设定为:[0.8,1.0]、[0.6,0.8]、[0.4,0.6]、[0.2,0.4]和[0.0,0.2]。

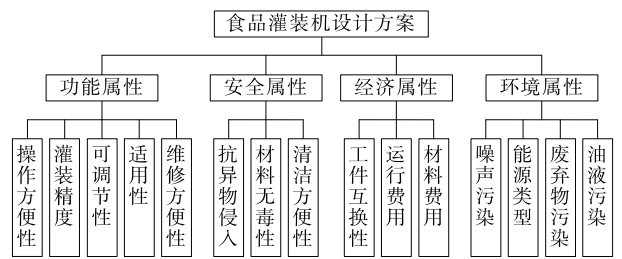


图 1 食品灌装机设计方案评价指标体系

Figure 1 Food filling machine design scheme evaluation index system

2 基于 IAHP 确定评价指标权重

确定科学的指标权重是进行评价、评估或决策的关键,目前客观赋权法、主观赋权法和主客观综合赋权法是确定指标权重的主要方法。主观赋权法能够有效地结合专家的知识 and 经验,得出的指标权重会更加符合客观实际,因而在确定指标权重方面得到了广泛的应用。食品灌装机设计方案评价指标体系复杂,并且评价指标多是难以量化的定性指标,不宜采用客观赋权法,而采用主观赋权法获取的指标权

重更加符合安全评价实践。本文拟采用区间层次分析法计算食品灌装机设计方案评价的区间数权重。

2.1 区间数和 IAHP 的基本原理

区间数在模糊理论上属于一类特殊的模糊数,在某种意义上可看作是实数的拓展。在决策过程中,利用区间数进行不确定的多属性决策,可使决策信息更加简单直接、运算快捷,在各领域中应用非常广泛^[10-12]。假设 $\tilde{a} = [a_1, a_2] = \{a_1 \leq x \leq a_2, a_1, a_2 \in R\}$ 为实数轴上的一个闭区间,那么 $\tilde{a}$ 即为一个区间数。如果 $\tilde{a} = \{x | 0 \leq a_1 \leq x \leq a_2\}$, 那么 $\tilde{a}$ 为正区间数。令 $\tilde{a} = [a_1, a_2], \tilde{b} = [b_1, b_2], k \geq 0$, 则有如下所示的 2 个区间数的运算法则^[13]:

- (1) 加法: $\tilde{a} + \tilde{b} = [a_1 + b_1, a_2 + b_2]$ 。
- (2) 减法: $\tilde{a} - \tilde{b} = [a_1 - b_2, a_2 - b_1]$ 。
- (3) 数乘: $k\tilde{a} = [ka_1, ka_2]$ 。
- (4) 乘法: $\tilde{a} \times \tilde{b} = [\min\{a_1b_1, a_1b_2, a_2b_1, a_2b_2\}, \max\{a_1b_1, a_1b_2, a_2b_1, a_2b_2\}]$ 。

为了克服层次分析法 (Analytic hierarchy process, AHP) 在计算指标权重过程中存在的不足,在 AHP 的基础上逐步研究发展产生了区间层次分析法 (Interval-based AHP, IAHP)。与 AHP 法相比,IAHP 用区间数代替点值来构造区间数判断矩阵,有效地计算多目标决策中的指标权重,计算结果和原始数据都以区间数的形式表达。

假设 $\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n}$ 是一个区间数判断矩阵,即 $\tilde{a}_{ij} = [a_{ij}^L, a_{ij}^U]$ 。记 $A^L = (a_{ij}^L)_{n \times n}, A^U = (a_{ij}^U)_{n \times n}$, 并记 $\tilde{A} = [A^L, A^U]$ 。对于区间数向量 $\tilde{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$, 即 $\tilde{x}_i = [x_i^L, x_i^U]$, 记 $x^L = (x_1^L, x_2^L, \dots, x_n^L)^T, x^U = (x_1^U, x_2^U, \dots, x_n^U)^T, \tilde{x} = [x^L, x^U]$ 。假设 $\tilde{A} = [A^L, A^U]$ 是一个给定的区间数判断矩阵,IAHP 计算评价指标区间数权重的具体步骤为^[10]:

Step 1: 利用特征向量法分别求 A^L, A^U 的最大特征值所对应的具有正分量的归一化特征向量 x^L 和 x^U 。

Step 2: 由 $A^L = (a_{ij}^L)_{n \times n}$ 和 $A^U = (a_{ij}^U)_{n \times n}$, 按式 (1)、(2) 计算 α 和 β 。

$$\alpha = \left[\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^U} \right]^{1/2}, \tag{1}$$

$$\beta = \left[\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^L} \right]^{1/2}。 \tag{2}$$

Step 3: 计算得出评价指标区间数形式的权重向量 $\tilde{\omega} = [\alpha x^L, \beta x^U]$ 。

2.2 确定评价指标的区间数权重

根据 IAHP 计算评价指标权重的方法,在广泛征求食品灌装机设计专家意见的基础上,可以建立食品灌装机设计方案评价一级指标的区间数判断矩阵,如表 1 所示。根据表 1 中的区间数,按照 IAHP 的具体步骤则能得到 $\alpha = 0.914\ 2, \beta = 1.076\ 8, x^L = (0.446\ 3, 0.287\ 7, 0.188\ 1, 0.149\ 8), x^U =$

(0.394 7,0.266 2,0.180 1,0.144 9),进一步可得到桥式起重机安全评价指标体系中一级指标的区间数权重向量 $\tilde{\omega} = ([0.408, 0.425], [0.263, 0.287], [0.172, 0.194], [0.137, 0.156])^T$ 。同理,可以得到桥架、起升机构、运行机构和人的安全因素 4 个一级指标下各二级指标的区间数权重,如表 2 所示。其中, ω_{ij} 为第 i 个一级指标下第 j 个二级指标的权重。

表 1 一级评价指标的区间数判断矩阵

Table 1 Interval number judgment matrix of primary evaluation index				
一级指标	功能属性	安全属性	经济属性	环境属性
功能属性	[1,1]	[1,2]	[2,3]	[3,4]
安全属性	[1/2,1]	[1,1]	[1,2]	[1,3]
经济属性	[1/3,1/2]	[1/2,1]	[1,1]	[1,2]
环境属性	[1/4,1/3]	[1/3,1]	[1/2,1]	[1,1]

表 2 二级评价指标的区间数权重

Table 2 Interval weights for secondary evaluation indicators					
权重	区间权重值	权重	区间权重值	权重	区间权重值
ω_{11}	[0.19,0.21]	ω_{21}	[0.21,0.24]	ω_{33}	[0.18,0.22]
ω_{12}	[0.28,0.32]	ω_{22}	[0.66,0.69]	ω_{41}	[0.16,0.19]
ω_{13}	[0.08,0.11]	ω_{23}	[0.07,0.11]	ω_{42}	[0.22,0.25]
ω_{14}	[0.29,0.33]	ω_{31}	[0.38,0.41]	ω_{43}	[0.27,0.29]
ω_{15}	[0.09,0.12]	ω_{32}	[0.39,0.43]	ω_{44}	[0.31,0.34]

3 基于 IAHP 和隶属度的灌装机设计方案评价模型

前面构建了食品灌装机设计方案评价的指标体系,设定了方案优劣评价等级,确定了一级和二级评价指标的区间数权重,下面根据区间数和 IAHP 的基本原理以及隶属度理论,构建基于 IAHP 和隶属度的食品灌装机设计方案评价模型,具体的步骤:

Step 1:广泛征求食品灌装机设计专家的意见建议,构建食品灌装机设计方案评价指标体系。

Step 2:按照 IAHP 基本原理构建区间数判断矩阵,然后计算设计方案评价指标体系中各级指标的区间数权重。

Step 3:邀请专家给出食品灌装机设计方案二级评价指标相对于方案优劣评价等级的隶属度。

Step 4:将专家对二级指标 I_{ij} 给出的隶属度与 5 级方案优劣评价等级区间数相结合,进而规范化为区间数, $\tilde{a}_{ij} = k_{ij1} \times (0.8, 1.0] + k_{ij2} \times (0.6, 0.8] + k_{ij3} \times (0.4, 0.6] + k_{ij4} \times (0.2, 0.4] + k_{ij5} \times [0, 0.2]$, 其中, $\tilde{a}_{ij}$ 为第 i 个一级指标下第 j 个二级指标的规范化区间数, k_{ij1} 、 k_{ij2} 、 k_{ij3} 、 k_{ij4} 和 k_{ij5} 分别为专家对指标 I_{ij} 给出“好”“较好”“一般”“较差”“差”的

隶属度。

Step 5:利用公式 $\bar{R}_i(\tilde{\omega}_i) = \sum_{j=1}^m \tilde{a}_{ij} \times \tilde{\omega}_{ij}$ 聚合各一级评价指标的区间数评价价值,其中: $i = 1, 2, 3, 4$, m 为第 i 个一级指标下二级指标的个数。利用公式 $\bar{R}(\tilde{\omega}) = \sum_{i=1}^4 \bar{R}_i \times \tilde{\omega}_i$ 计算食品灌装机设计方案区间数评价价值并与优劣评价等级进行对比分析。

4 方案评价实例

为了验证本研究所构建的设计方案评价模型的合理性、有效性,现以一款多用途辣椒料自动灌装设备设计方案为例进行评价分析。为了提升油辣椒产业加工自动化水平,推动产业加速转型升级,贵州省某大学重点实验室在对灌装设备需求进行市场调研的基础上,提出了 2 种灌装设备设计方案,方案 A:物料的搅拌采用螺旋搅拌器,送料、吸料功能通过气压式驱动活塞的往复运动来实现,定量灌装以定量杯完成;方案 B:活塞动作依靠液压传动完成,采用框式结构的搅拌器,定量灌装以控制容器的液位来实现。邀请 10 位专家对方案 A 的 15 个二级指标进行定性评价,对各个二级指标优劣等级给出了隶属度,如表 3 所示。按照食品灌装机设计方案评价模型的步骤 4,将优劣等级隶属度转换为规范化的区间数评价价值,如表 4 所示,其中 I_{ij} 表示第 i 个一级指标下的第 j 个二级指标。

根据食品灌装机设计方案评价模型中给出的指标聚合方法,采用 MATLAB 6.5 软件编写简易计算程序,经运算可

表 3 二级评价指标的优劣等级隶属度

Table 3 The degree of membership of the second-level evaluation index					
指标	好	较好	一般	较差	差
操作方便性	0.72	0.10	0.18	0.00	0.00
灌装精度	0.70	0.22	0.02	0.06	0.00
可调节性	0.60	0.20	0.10	0.10	0.00
适用性	0.84	0.08	0.00	0.04	0.04
维修方便性	0.66	0.24	0.06	0.04	0.00
抗异物侵入	0.50	0.20	0.10	0.14	0.06
材料无毒性	0.60	0.24	0.10	0.06	0.00
清洁方便性	0.40	0.20	0.14	0.20	0.06
工件互换性	0.76	0.14	0.06	0.04	0.00
运行费用	0.54	0.26	0.12	0.06	0.02
材料费用	0.50	0.24	0.14	0.06	0.06
噪声污染	0.60	0.14	0.20	0.04	0.02
能源类型	0.24	0.40	0.36	0.00	0.00
废弃物污染	0.20	0.50	0.20	0.10	0.00
油液污染	0.58	0.30	0.12	0.00	0.00

表 4 二级评价指标的规范化区间数评价价值

Table 4 Normalized interval number evaluation value of secondary evaluation index

指标	区间值	指标	区间值	指标	区间值
I_{11}	(0.708,0.908]	I_{21}	(0.588,0.788]	I_{33}	(0.612,0.812]
I_{12}	(0.712,0.912]	I_{22}	(0.646,0.946]	I_{41}	(0.652,0.852]
I_{13}	(0.660,0.860]	I_{23}	(0.536,0.736]	I_{42}	(0.576,0.776]
I_{14}	(0.728,0.928]	I_{31}	(0.724,0.924]	I_{43}	(0.560,0.760]
I_{15}	(0.704,0.904]	I_{32}	(0.648,0.848]	I_{44}	(0.692,0.892]

以得到功能属性、安全属性、经济属性和环境属性 4 个一级评价指标的评价价值分别为 (0.66,0.98], (0.58,0.92], (0.64,0.94], (0.59,0.88], 将 4 个一级指标继续向上聚合, 便可得到设计方案 A 的区间数评价值为 (0.61,0.97]。为了便于分析, 取设计方案 A 区间数评价值的中间值 0.79, 与优劣等级对比可知, 设计方案 A 的评价结果为“较好”, 即优劣等级为 2 级, 但处于 2 级的上限接近于 1 级。同理可算得, 4 个一级评价指标的评价值中间值分别为 0.820, 0.750, 0.790, 0.735, 相对应的优劣评价等级分别为“好”“较好”“较好”“较好”。相比较而言, 方案 A 的功能属性要好一些。采用同样的方法对设计方案 B 进行评价, 可得方案 B 的评价值为 (0.54, 0.82], 中间值为 0.68, 虽然也为“较好”, 但不如方案 A。此评价结果与文献[10]得出的定性评价结论相一致, 文献[10]的评价方法仅得出了设计方案的总体优劣等级, 未能给出一级评价指标的优劣程度, 从而验证了本文所提出的食品灌装机设计方案评价模型是合理有效的。

5 结论

食品灌装机设计方案评价是衡量设计方案优劣和优化设计方案的重要手段。针对食品灌装机设计方案评价具有的区间性、不确定性这一特点, 将区间数理论和区间层次分析法相结合计算出了食品灌装机设计方案评价指标的区间数权重, 克服了其它方法计算指标权重的不足。构建了基于区间层次分析法和隶属度的食品灌装机设计方案评价模型,

提出采用区间数优劣等级和隶属度相融合的方法对定性评价价值进行区间量化处理的方法。实例评价结果表明, 本研究所用评价方案有效可行。本研究不足之处在于评价实例中用区间数评价值的中间值对比方案优劣, 虽然结论正确, 但没有体现出区间数的特殊性, 在今后的研究中将采用区间数的排序算法来衡量各方案的优劣。

参考文献

[1] 张肖, 李艳. 基于 TRIZ 的印刷机械创新设计方案评价体系研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2012: 20-33.

[2] 王桂萍, 贾亚洲, 周广文. 基于模糊可拓层次分析法的数控机床绿色度评价方法及应用[J]. 机械工程学报, 2010, 46(3): 142-147.

[3] 田启华, 肖人彬. 基于信息公理和模糊数学的设计方案评价方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 136-140.

[4] 焦玉民, 张琦, 王强. 基于模糊层次分析法的工程机械质量评价[J]. 中国工程机械学报, 2010, 8(4): 489-494.

[5] 宾光富, 周元. 基于 Fuzzy-AHP 的机械设备多特征参数健康状态综合评价研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(20): 2 487-2 492.

[6] 刘静, 杨佳馨, 管骁. 贝叶斯网络在微生物定量风险评估中的应用[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 215-220.

[7] 张建辉, 张丽, 汪霞丽, 等. 白酒中两种邻苯二甲酸酯类膳食暴露风险评估[J]. 食品与机械, 2017, 33(1): 45-47.

[8] 黄己立, 杨茂盛, 欧剑. 基于神经网络算法的公共建筑设计方案评价模型[J]. 统计与决策, 2009(14): 37-39.

[9] 杨涛, 杨育, 张雪峰, 等. 基于客户聚类分析的产品概念设计方案评价决策方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(7): 1 669-1 678.

[10] 任甲举, 刘丹. 基于改进模糊层次分析法的食品机械设计方案评价[J]. 机械设计与制造, 2017(3): 20-22.

[11] 刘雅荣. 基于区间层次分析法的机械加工工艺方案评价研究[J]. 机械设计与制造, 2015(12): 258-260.

[12] 李春强. 基于区间层次分析法的舰船动力系统方案评估研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(13): 124-127.

[13] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 101-104.

(上接第 28 页)

[18] JIANG Zhan-mei, RAI D K, O'CONNOR P M, et al. Heat-induced Maillard reaction of the tripeptide IPP and ribose: Structural characterization and implication on bioactivity[J]. Food Research International, 2013, 50(1): 266-274.

[19] 张严, 汪何雅, 钱和. 美拉德反应产物的褐变、荧光吸收及抗氧化性的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(6): 193-196.

[20] 卢彬, 王忠合, 王军, 等. 温度对金带细鲈鱼肉水解物美拉德反应及其产物抗氧化性的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 25-29.

[21] VHANGANI L N, VAN W J. Antioxidant activity of Maillard

reaction products (MRPs) derived from fructose-lysine and ribose-lysine model systems[J]. Food Chemistry, 2013, 137(1/2/3/4): 92-98.

[22] KUCHLYAN J, KUNDU N, BANIK D, et al. Spectroscopy and fluorescence lifetime imaging microscopy to probe the interaction of bovine serum albumin with graphene oxide[J]. Langmuir the Acs Journal of Surfaces & Colloids, 2015, 31(51): 13 793-13 801.

[23] KIM J S, LEE Y S. Enolization and racemization reactions of glucose and fructose on heating with amino-acid enantiomers and the formation of melanoidins as a result of the Maillard reaction[J]. Amino Acids, 2008, 108(2): 582-592.