

灰色关联分析与云模型集成的方案评价方法^{*}

耿秀丽, 董雪琦, 徐士东
(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 针对传统方案评价方法中大多没有考虑评价信息随机性的情况, 运用云模型建立云评价标度。针对传统客观属性权重确定方法主要依据属性值分布, 没有考虑到指标间的相互影响关系的问题, 将熵值法和 DEMATEL 结合计算指标权重, 其中采用云距离测度算法直接计算定性评价间的距离, 避免了定性云转换为定量值时的信息损失。采用灰色关联分析处理云评价指标, 对方案进行排序。利用方案总体云评价绘制云图, 定性比较各方案优劣。最后以实例验证了所提方法的有效性。

关键词: 方案评价; 云模型; DEMATEL; 灰色关联分析

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2018)08-2351-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2018.08.027

Concept evaluation approach based on gray incidence analysis and cloud model

Geng Xiuli, Dong Xueqi, Xu Shidong
(Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at most of the traditional evaluation methods do not consider the randomness of the evaluation information, this paper used the cloud model to establish the cloud evaluation scale. The traditional approaches calculate objective attributes weight mainly according to the distribution of attributes value and do not consider the relationship between the attributes. This paper combined entropy method and DEMATEL to calculate the weight of the attributes. And it used cloud distance measure algorithm to calculate the distance between the qualitative evaluation. It could avoid the loss of information. This paper used gray incidence analysis to process the cloud evaluation attributes, and sorted the scheme. Using the overall cloud of the scheme to draw the cloud map, this paper qualitatively compared the quality of each scheme. Finally it gave out an application example to demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: scheme evaluation; cloud model; DEMATEL; grey incidence analysis

0 引言

方案评价是产品/服务设计阶段初期的重要环节, 其对产品/服务后续阶段的制造有重要影响。传统的方案评价方法多采用基于模糊集及其扩展理论的多属性决策方法来获得方案优劣排序。文献[1]将三角模糊数与逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)相结合, 提出一种模糊 TOPSIS 排序方案来选择最佳产品设计方案; 文献[2]在综合层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和 TOPSIS 的基础上引入三角模糊数, 建立模糊评价模型选择最优方案; 文献[3]通过直觉模糊理论表达信息的不确定性, 并综合决策实验与评价实验方法(decision making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)和多准则妥协解排序(vlsekriterijumska optimizacija i kompromisno resenje, VIKOR)方法得到备选方案最佳排序; 文献[4]通过粗糙数的形式获取用户需求偏好, 并运用 VIKOR 方法获得方案排序; 文献[5]采用粗糙集和模糊集来表达信息的不确定性和模糊性, 通过每个备选方案和正负理想解之间的距离来比较方案优劣。上述方案评价方法在获取评价信息时, 仅考虑到了信息的模糊性和不确定性, 没有将评价信息的随机性考虑在内, 且最终评价结果为方案排序, 定量比较各个方案的优劣程度, 在评价结果相近的情况下, 不能具体反映评审专家对各个方案的认可程度。云模型是一种定量定性之间相互转换的有效工具, 将模糊信息的不确定性和随机性进行了统一描述, 能够更加客观地表达评价信息。文

献[6]将云模型和空间故障树(space fault tree, SFT)理论相结合, 使用云化 SFT 作为基础, 对数据不确定性进行评价; 文献[7]将云模型引入到信任机制中, 利用灰色预测理论考虑节点是否值得信任; 文献[8]提出了同类概念云模型间贴近度的计算方法; 文献[9]将前景理论和云模型相结合, 通过比较各方案综合前景值对方案进行优劣排序。

在方案评价过程中, 通常需要确定各评价指标权重。熵值法通过指标之间的离散程度来确定权重, 目前在各个领域已得到广泛应用^[10-12]。熵值法这类客观权重确定法在确定权重信息时, 仅考虑了指标间的差异程度, 忽视了指标间的相互影响关系, 不够全面。DEMATEL 是分析指标间相互影响关系的一种方法, 文献[13]将灰色理论和 DEMATEL 相结合来评估因素之间的因果关系。DEMATEL 方法也可用来计算指标权重; 文献[14]运用模糊 DEMATEL 确定指标权重信息; 文献[15]利用 DEMATEL 方法对集合因素进行定量分析, 得出重要度排序。将熵值法和 DEMATEL 方法相结合, 综合考虑指标权重, 使其确定更为合理。

灰色关联分析基本思想是根据序列曲线几何形状来判断不同序列间的联系是否紧密^[16], 通过因素间关联度的大小来比较方案的优劣。文献[17]在层次分析法的基础上, 利用灰色关联度对产品质量系统中的顾客满意度进行综合评价; 文献[18]将灰色系统理论和证据理论相结合来建立推理决策模型; 文献[19]运用灰色网络分析法计算评价指标权重, 构建灰色多准则优化方法; 文献[20]将灰色理论和 DEMATEL 相结合

收稿日期: 2017-03-30; 修回日期: 2017-05-04 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71301104, 51475290); 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20133120120002, 20120073110096); 上海市教育委员会科研创新项目(14YZ088); 上海市一流学科资助项目(S1201YLKK); 沪江基金资助项目(A14006)

作者简介: 耿秀丽(1984-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为产品服务系统、服务科学、产品/服务方案设计技术、数据挖掘等; 董雪琦(1993-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为管理科学与工程(D_xueqi@126.com); 徐士东(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为产品服务系统、决策科学与优化等。

来确定优先级标准。

本文首先采用云模型表示语义评价信息,通过云的集成将各个专家评价集结为总评价云;其次运用熵权法和 DEMATEL 方法相结合确定云评价指标权重;然后利用灰色关联分析和云距离测度算法计算各评价方案的关联度,获取方案优劣程度排序;最后将各个方案的总评价云通过正向云发生器绘制云图,定性比较各个方案的优劣。

1 云模型及相关方法

云模型不仅可以表示信息的模糊性,还可以表示信息的随机性,是一种定性评价与定量评价之间相互转换的有效工具。云模型用数字特征(E_x , En , He)定性表示语言评价信息,其中期望值 E_x 是最能反映这一定性信息的数值;熵值 En 表示 E_x 的离散程度,熵值越大,正态云图的跨度越大, E_x 的模糊性越大;超熵值 He 表示 En 的离散程度,超熵值越大,云滴的离散程度就越大,云层的厚度越厚,反映了定性信息的随机性。

将决策者的各个评价用自然语言表示,并将其分为 n 个,一般 n 为奇数。其有效论域为 $[X_{\min}, X_{\max}]$ 。本文采用 $n=5$,即语言评价等级有五个的情况,采用黄金分割法得到评价标度。计算得到云评价标度分别为: E_2 很好 (1, 0.103, 0.026), E_1 好 (0.691, 0.064, 0.016), E_0 一般 (0.5, 0.039, 0.01), E_{-1} 较差 (0.309, 0.064, 0.016), E_{-2} 差 (0, 0.103, 0.026)。通过云模型构成云评价标度如图1所示,其中横坐标表示评价值,纵坐标表示选取该评价值的确定度。

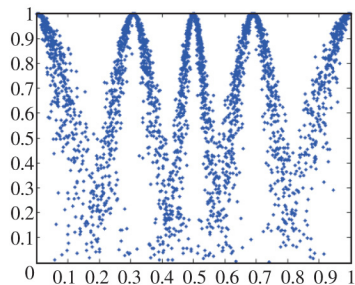


图1 云评价标度

1.1 云的集成

云的集成是将不同的云模型通过一定的运算法则叠加集成为一朵综合云的过程。设 $E_k(E_{x_k}, E_{n_k}, E_{h_k})$ ($k=1, \dots, n$) 为 n 朵不同的云, μ_k ($k=1, \dots, n$) 分别为各个云所对应的权重,集成的综合云为 $E_0(E_{x_0}, E_{n_0}, E_{h_0})$,则综合云的集成公式如下:

$$\begin{aligned} E_{x_0} &= \mu_1 E_{x_1} + \mu_2 E_{x_2} + \dots + \mu_n E_{x_n} \\ E_{n_0} &= \sqrt{(\mu_1 E_{n_1})^2 + (\mu_2 E_{n_2})^2 + \dots + (\mu_n E_{n_n})^2} \\ E_{h_0} &= \sqrt{(\mu_1 E_{h_1})^2 + (\mu_2 E_{h_2})^2 + \dots + (\mu_n E_{h_n})^2} \end{aligned} \quad (1)$$

1.2 云的距离测度

云距离是指两朵不同的云之间的距离。云距离测度算法输入为两朵云的三个特征值 $E_1(E_{x_1}, E_{n_1}, E_{h_1})$, $E_2(E_{x_2}, E_{n_2}, E_{h_2})$ 和云滴数 n 。输出为两朵云之间的距离 $d(E_1, E_2)$ 。算法具体步骤如下:

- 两朵云通过正向云发生器各自生成 n 个云滴;
- 将各自云滴按横坐标大小从小到大进行排列;
- 对云滴进行筛选,保留落在 $[E_x - 3En, E_x + 3En]$ 的云滴;
- 设筛选后的两朵云的云滴数分别 n_1 和 n_2 ,假设 $n_1 > n_2$,将第一朵云 n_1 个云滴中随机选取 n_2 个云滴,对云滴按横坐标从小到大进行排序,保留在集合 drop1 和 drop2 中,若 $n_1 < n_2$ 则与此类似;
- 将两个集合 drop1 和 drop2 按对应的次序计算各云滴 ($x, \mu(x)$) 之间的距离:

$$d(E_1, E_2) = d(\text{drop1}, \text{drop2}) = \frac{1}{n_2} \sum_{k=1}^{n_2} \sqrt{(x_{1k} - x_{2k})^2 + (\mu(x)_{1k} - \mu(x)_{2k})^2} \quad (2)$$

上述与距离测度算法通过利用云滴之间的距离对两朵云

之间的距离进行测量,充分考虑了云模型随机性的特点,比利用数字特征法进行距离测算具有更高的可靠性。此外,由于云滴的产生具有一定的随机性,计算出来的距离也具有一定的随机性。取 $E_x = 1$, $En = 0.103$,当超熵 He 相同都为 0 时,通过上述算法计算两朵云之间的距离, $d_1 = 0.0183$,当取 $He_1 = 0$, $He_2 = 0.3$ 时,两朵云之间的距离为 $d_2 = 0.0849$,计算结果从侧面反映了当两朵云超熵相距较大时,云距离也越大,两朵云之间的贴进度也越低。

2 云模型下评价指标权重的计算

在方案评价过程中,需要确定指标权重,熵值法反映了指标间信息的离散性,DEMATEL 反映了指标间的相互影响关系,将熵值法和 DEMATEL 相结合确定指标权重,计算结果更加合理准确。本文用云模型表示指标评价信息,设 M_j 表示第 j ($j=1, 2, \dots, m$) 个指标,共有 i ($i=1, 2, \dots, n$) 个评价方案, $E_{ij}(E_{x_{ij}}, E_{n_{ij}}, E_{h_{ij}})$ 是第 i 个评价方案中第 j 个指标的云评价信息; $E_{ij}^k(E_{x_{ij}^k}, E_{n_{ij}^k}, E_{h_{ij}^k})$ 是第 k 个专家对属性间影响程度云评价信息; w_j 表示各指标初始权重; λ_j 表示各指标重要度; w_j^* 表示各指标最终权重。

2.1 熵值法确定指标初始权重

熵反映了信息的不确定性,评价指标的离散程度越大,熵值越小,说明该指标对综合评价的影响越大,权重也就越大。在文献[21]提出的熵值法计算指标权重的基础上,将云距离测度应用于熵值法的计算过程,提出云模型和熵值法相结合来确定定性指标的权重。传统熵值法计算定性指标权重的过程中,将评价术语转换为定量数据,再进行计算。本文提出的云模型和熵值法结合的方法通过云距离测度直接计算定性指标之间的距离,在考虑到定性评价模糊性的基础上,还考虑到定性评价信息随机性的特点,提高了计算结果的准确性和可靠性。

设 $E_j^*(E_{x_j}^*, E_{n_j}^*, E_{h_j}^*)$ 是目标 G_j ($j=1, 2, \dots, m$) 下的理想属性值; E_{ij} 是第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 个评价方案中第 j ($j=1, 2, \dots, m$) 个指标的云评价信息; $d(E_{ij}, E_j^*)$ 表示该评价值到理想属性之间的云距离测度,距离越大,两朵云之间的相似程度就越小。云—熵值法计算定性指标权重的步骤如下:

- 将方案评价决策矩阵 $E = (E_{ij})_{n \times m}$ 利用式(2)转换为云距离测度矩阵 $D = (d(E_{ij}, E_j^*))_{n \times m}$;

- 将云距离测度矩阵规范化,利用

$$P_{ij} = \frac{d(E_{ij}, E_j^*)}{\sum_{i=1}^n d(E_{ij}, E_j^*)} \quad (3)$$

将云距离矩阵 $D = (d(E_{ij}, E_j^*))_{n \times m}$ 规范化为矩阵 $P = (P_{ij})_{n \times m}$;

- 求出属性 G_j 下的熵值

$$S_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

其中: $k > 0$ 为常数; \ln 为自然对数, $S_j \geq 0$, $j=1, 2, \dots, m$ 。对于属性 G_j ,如果 P_{ij} 全部相等,即 $P_{ij} = 1/n$, $i=1, 2, \dots, n$,那么 S_j 取极大值,即 $S_j = k \ln n$,这里取 $k = 1/\ln n$,则 $0 \leq S_j \leq 1$ 。

- 计算属性 G_j 下的各方案属性值的偏差程度系数 d_j ,因为 $0 \leq S_j \leq 1$,根据属性 G_j 下的熵 S_j 的大小与属性 G_j 下的各方案属性值的偏差程度是相反的原则,所以定义属性 G_j 下的各方案属性的偏差程度系数:

$$d_j = 1 - S_j \quad j=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

- 计算各指标初始权重 w_j :

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (6)$$

2.2 DEMATEL 法计算指标重要度

DEMATEL 方法用来分析方案各个属性之间的相互影响关系,本文将云模型和 DEMATEL 方法结合用来修正熵值法确定的指标权重。基于云-DEMATEL 方法修正指标权重的步骤

如下:

a) 建立云评价初始直接关系矩阵,假设共有 $p(p=1, 2, \dots, s)$ 个专家对各个方案指标关联关系进行评价,通过云评价标度将评价值转换为云模型, R^k 为第 k 个专家通过评价构成的云评价初始直接关系矩阵:

$$R^k = \begin{bmatrix} 0 & r_{12}^k & \cdots & r_{1n}^k \\ r_{21}^k & 0 & \cdots & r_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1}^k & r_{n2}^k & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: $r_{ij}^k (Ex_{ij}^k, En_{ij}^k, He_{ij}^k)$ 表示第 k 个专家对属性间影响关系的云评价,主对角线上元素恒为 $(0, 0, 0)$ 。

b) 将云评价初始直接关系矩阵汇总,运用式(1)求出所有专家对评价指标的总云评价初始直接关系矩阵:

$$R = \frac{1}{s} (R^1 + R^2 + \cdots + R^s) \quad (8)$$

c) 将云评价初始直接关系矩阵转换为云距离测度矩阵。评价指标影响越大,评价越好,该指标离最优评价的距离也越小,体现在数值上也越小。因此,设 $r^* (Ex^*, En^*, He^*)$ 是最优指标评价,这里取云评价标度中最差评价 $(0, 0.103, 0.026)$ 作为基准云评价进行计算云距离,云距离越大,影响度也越大。计算各个元素到基准云之间的云距离 $d(r_{ij}^k, r^*)_{ij}$,构建出云距离测度矩阵:

$$D = (d(r_{ij}^k, r^*)_{ij})_{n \times m} \quad (9)$$

d) 将云距离测度矩阵标准化。设 r'_{\max} 为云距离测度矩阵 $D = (d(r_{ij}^k, r^*)_{ij})_{n \times m}$ 中各行元素之和的最大值,则标准化矩阵为

$$N = \frac{D}{r'_{\max}} \quad (10)$$

e) 计算直接关系矩阵:

$$T = N(1 - N)^{-1} \quad (11)$$

f) 计算各个指标属性的相对重要度,令 R_j 为总直接关系矩阵 T 各行元素之和,表示属性 M_j 对其他属性影响的总强度; C_j 为总直接关系矩阵 T 各列元素之和,表示属性 M_j 受其他属性影响的总强度; $R_j + C_j$ 表示属性 M_j 的中心度; $R_j - C_j$ 表示属性 M_j 的原因度。若 $R_j - C_j > 0$,说明属性 M_j 对其他属性的影响较大,若 $R_j - C_j < 0$,说明属性 M_j 受其他属性的影响较大,则各个属性的重要度为

$$\lambda_j = \sqrt{(R_j + C_j)^2 + (R_j - C_j)^2} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (12)$$

根据各个属性的重要度计算其相对重要度为

$$\lambda'_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (13)$$

2.3 计算指标权重

根据熵值法计算得到的初始权重和 DEMATEL 计算得到的指标重要度计算权重:

$$w'_j = \alpha \lambda'_j + (1 - \alpha) w_j \quad j=1, 2, \dots, m, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (14)$$

其中: α 表示专家对关联关系对属性权重影响程度的评分, α 越大,属性间的关联关系对权重的影响就越大,反之亦然。当 $\alpha=0$ 时,说明专家决策认为可以不考虑属性之间的关联关系对权重的影响。

3 基于云模型和灰色关联分析法的方案评价

灰色关联分析是通过比较各个方案与理想方案之间的关联度来判断该方案的优劣,关联度越大,说明该方案越接近理想方案,方案评价越好。在计算关联系数的过程中,需要计算各个方案评价指标与理想方案评价指标之间的距离,考虑到评价指标为云模型,将云距离测度算法引入灰色关联分析,解决了云评价指标计算关联度的问题。本文将云模型与灰色关联分析结合,计算定性评价之间的关联系数,基于云模型和灰色关联分析法的方案评价方法具体步骤如下:

a) 设 $A_i = [E_{i1}, E_{i2}, \dots, E_{im}]$ 为方案 $i(i=1, 2, \dots, n)$ 专家评价集成之后的云评价,理想方案 $A_0 = [E_{01}, E_{02}, \dots, E_{0m}]$,其

中 $E_{01}, E_{02}, \dots, E_{0m}$ 为各个指标属性评价最优值,指标通常分为效益型和成本型,效益型指标的最优值为各个方案中最大值,成本型指标最优值为各个方案中最小值。方案 A_i 与理想方案 A_0 之间关于第 $j(j=1, 2, \dots, m)$ 个属性的关联系数为

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$$

$$\Delta_{\min} = \min_i [\min_j (d(E_{ij}, E_{0j}))]$$

$$\Delta_{\max} = \max_i [\max_j (d(E_{ij}, E_{0j}))]$$

$$\Delta_i(k) = d(E_{ik}, E_{0j}) \quad (15)$$

其中: ρ 为分辨系数,根据文献[17]这里选取 $\rho=0.69$ 。

b) 计算第 i 个方案与理想方案的关联度:

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^m w'_j \xi_{ij} \quad (16)$$

按关联度的大小对各个方案进行排序,由于各个方案属性值均是由云模型进行表示,可以将各个方案云模型按式(1)进行集成,以云模型三个特征值为输入量,定性比较各个方案的优劣程度,从而选取合适的方案。

4 案例分析

某企业在针对其旗下某型号机床再制造的过程中,欲对其现有的五个方案进行评估。方案评价指标包括主传动变速系统(M_1)、刀架更换系统(M_2)、安全防护装置(M_3)、进给系统(M_4)、废旧机床利用率(M_5)、节能环保方案(M_6)。现采用所提方案评价方法,对产品设计方案进行评价。方案参数如表1所示。

表1 再制造候选方案指标参数

方案	指标					
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
A_1	交流无级变速	手动更换	敞开式	开环	0.85	切削回收盘
A_2	交流无级变速	回转刀架	敞开式	开环	0.80	切削回收盘
A_3	分段无级变速	转塔式	半防护	闭环	0.75	油雾回收器
A_4	直流数字化	带刀库式(链式)	半防护	半闭环	0.72	切削、油雾分离系统
A_5	直流数字化	带刀库式(箱式)	全防护	闭环	0.70	切削、油雾分离系统

在方案评价阶段,由10个专家对各个方案的属性值给出语义评价,并根据云评价标度将语义评价转换为云评价指标,以方案 A_1 为例,获取10个专家对方案 A_1 的评价值,并运用式(1)计算方案 A_1 的总评价集成云如表2所示。同理,可计算得到所有方案各个指标值总云评价集成云如表3所示。

表2 方案 A_1 各项评价指标评价数据

指标	差	较差	一般	好	很好	评价集成云
M_1	6	4	0	0	0	(0.124, 0.028, 0.007)
M_2	5	3	2	0	0	(0.193, 0.026, 0.007)
M_3	8	2	0	0	0	(0.062, 0.031, 0.008)
M_4	7	2	1	0	0	(0.112, 0.029, 0.007)
M_5	0	0	0	4	6	(0.876, 0.028, 0.007)
M_6	6	4	0	0	0	(0.124, 0.028, 0.007)

表3 所有方案各项评价指标总评价数据

方案	指标					
	M_1	M_2	...	M_6		
A_1	(0.124, 0.028, 0.007)	(0.193, 0.026, 0.007)	...	(0.124, 0.028, 0.007)		
A_2	(0.154, 0.027, 0.006)	(0.224, 0.025, 0.006)	...	(0.124, 0.028, 0.007)		
A_3	(0.385, 0.018, 0.004)	(0.557, 0.017, 0.004)	...	(0.538, 0.016, 0.004)		
A_4	(0.815, 0.026, 0.007)	(0.676, 0.021, 0.005)	...	(0.696, 0.022, 0.005)		
A_5	(0.846, 0.027, 0.007)	(0.696, 0.022, 0.005)	...	(0.746, 0.024, 0.006)		

将云评价很好(1, 0.103, 0.026)作为理想属性,计算由表3的云评价集成云构成的云评价矩阵的云距离测度矩阵,由式(2)计算得到云距离测度矩阵,并将云距离测度矩阵规范化后运用式(4)计算出各个评价指标的熵值,然后根据式(5)(6)计算出各个评价指标的权重分别为:0.170, 0.164, 0.167, 0.162, 0.171, 0.166。运用本文所提的云模型和 DEMATEL 结合的方法对计算出的权重进行修正。获取10个专家对各个评价指标之间相互影响程度评价,将其转换为云评价。这里影响关系之间的评价值很低、低、一般、高、很高分别对应云评价中

的差、较差、一般、好、很好。通过式(1)计算出10个专家对评价指标间评价总初始直接关系,如表4所示。

表4 评价指标间云评价总初始直接关系

指标	M_1	M_2	...	M_6
M_1	(0 0 0)	(0.174 0.02 7 0.007)	...	(0.093 0.029 0.007)
M_2	(0.243 0.024 0.006)	(0 0 0)	...	(0.481 0.017 0.004)
M_3	(0.481 0.013 0.003)	(0.155 0.027 0.007)	...	(0.124 0.028 0.007)
M_4	(0.062 0.031 0.008)	(0.343 0.020 0.005)	...	(0.174 0.027 0.007)
M_5	(0.381 0.020 0.005)	(0.393 0.019 0.005)	...	(0.684 0.021 0.005)
M_6	(0.124 0.028 0.007)	(0.343 0.020 0.005)	...	(0 0 0)

将云评价矩阵转换为云距离测度矩阵,然后根据式(9)将云距离测度矩阵标准化为直接关系矩阵,用式(10)~(12)求得评价指标的相对重要度,分别为0.151、0.075、0.059、0.362、0.156、0.197,最后根据式(13) α 分别取0、0.3、0.5、0.7、1求修正权重,修正后的评价指标权重如表5所示。

表5 α 不同的情况下指标权重

权重	指标					
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
$\alpha=0$	0.170	0.164	0.167	0.162	0.171	0.166
$\alpha=0.3$	0.164	0.137	0.135	0.222	0.167	0.175
$\alpha=0.5$	0.161	0.120	0.113	0.262	0.164	0.180
$\alpha=0.7$	0.156	0.102	0.091	0.302	0.161	0.188
$\alpha=1$	0.151	0.075	0.059	0.362	0.156	0.197

根据所有方案的总评价云矩阵计算各个方案评价指标属性与理想方案评价指标属性间的关联系数,运用式(2)将总云评价矩阵转换为云距离测度矩阵,并运用式(14)计算各个属性得关联系数,计算结果如表6所示。

表6 评价指标关联系数

方案	指标					
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
A_1	0.486	0.509	0.467	0.482	0.960	0.487
A_2	0.496	0.520	0.467	0.599	0.937	0.487
A_3	0.587	0.679	0.506	0.656	0.656	0.667
A_4	0.889	0.762	0.506	0.509	0.509	0.717
A_5	0.923	0.777	1	0.645	0.496	0.821

最后运用式(15)计算各个方案在不同权重下的关联度。计算结果如表7所示。

表7 不同权重下各个方案关联度

权重	方案				
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
$\alpha=0$	0.567	0.585	0.625	0.650	0.776
$\alpha=0.3$	0.565	0.590	0.629	0.642	0.762
$\alpha=0.5$	0.563	0.593	0.633	0.638	0.753
$\alpha=0.7$	0.562	0.596	0.636	0.633	0.743
$\alpha=1$	0.560	0.600	0.641	0.626	0.729

当方案评价指标之间的关联关系对权重影响从小变大时,根据关联度大小排序,方案优劣程度从 $A_5 > A_4 > A_3 > A_2 > A_1$ 变为 $A_3 > A_3 > A_4 > A_2 > A_1$,即在评价指标间关联关系较大的情况下,方案3要优于方案4,当评价指标间关联关系对权重影响不是很大时,方案4优于方案3。

在表8中 $\alpha=0.5$ 和 $\alpha=0.7$ 时方案3和4的关联度相差并不是很大,通过绘制方案3和4的云图来更加直观地比较方案优劣。取 $\alpha=0.7$ 时的权重,将各个方案所有属性云根据式(1)进行集成,得到各个方案的总评价云,计算结果如表8所示。

表8 $\alpha=0.7$ 时各个方案总评价云

权重	方案				
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
Ex	0.243	0.338	0.475	0.472	0.601
En	0.013	0.011	0.008	0.010	0.010
He	0.003	0.003	0.002	0.003	0.002

云模型的三个特征值中 Ex 最能反映方案的总体特征, Ex 越大,方案评价越好; En 表示方案的不确定性, En 越小,方案的不确定性越小,质量越稳定,反映在云图上其图像的跨度越小; He 表示熵值的不确定性,即该评价的随机性, He 越小,评价信息的离散程度越小,专家对该方案分歧小,认同程度高,方案更为可靠,反映在云图上图像的云滴厚度越小。从表8可以

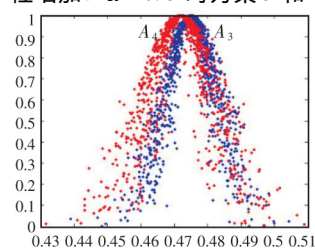
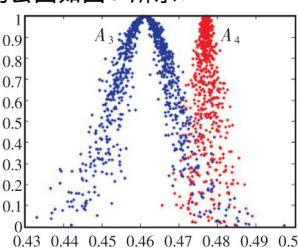
看出,云模型定性评价结果与灰色关联分析排序结果一致,最优排序为 $A_5 > A_3 > A_4 > A_2 > A_1$,方案3和4期望值比较相近, $\alpha=0.7$ 时,方案3和4的对比云图如图2所示。从图中可以看出,方案4的跨度和云层厚度均比方案3要大,说明方案3的专家认可程度高,方案设计较为可靠。

取 $\alpha=0.3$ 时的权重,将各个方案所有属性云根据式(1)进行集成,得到各个方案的总评价云,计算结果如表9所示。

表9 $\alpha=0.3$ 时各个方案总评价云

权重	方案				
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
Ex	0.248	0.321	0.461	0.477	0.624
En	0.012	0.011	0.008	0.001	0.001
He	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002

对比表8,随着方案属性间关联关系对权重影响的减小,最优排序变为 $A_5 > A_4 > A_3 > A_2 > A_1$,方案4的期望增大,熵值和超熵值减小,方案3期望减小,熵值和超熵值不变,反映出关联关系之间的影响程度对方案4的影响较大,方案4各个属性间关联关系重要度也比方案3要大。且随着 α 的减小,方案4的云层厚度和跨度在减小,不确定性也在减小,设计方案可靠性增加。 $\alpha=0.3$ 时方案3和4的云图如图3所示。

图2 方案3和4对比云图 ($\alpha=0.7$)图3 方案3和4对比云图 ($\alpha=0.3$)

将本文所提基于云模型信息处理方法与精确数值方法进行比较,分别用1、3、5、7、9对应差、较差、一般、好、很好,通过算术平均获得群决策值,用本文所提灰色关联分析方法计算不同 α 下的关联度,如表10所示。

表10 采用三角模糊数不同权重下各个方案关联度

权重	方案				
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
$\alpha=0$	0.610	0.632	0.641	0.653	0.711
$\alpha=0.3$	0.609	0.627	0.643	0.651	0.710
$\alpha=0.5$	0.609	0.623	0.644	0.650	0.709
$\alpha=0.7$	0.608	0.620	0.645	0.649	0.708
$\alpha=1$	0.607	0.615	0.647	0.648	0.707

从表10可以看出,当关联关系对属性权重的影响由小变大时,按关联度大小排序,方案的优劣程度均为: $A_5 > A_4 > A_3 > A_2 > A_1$ 。在 $\alpha=0.7$ 和 $\alpha=1$ 时,方案3和4关联度数值较为接近,不好区分,不能直观反映专家对方案的认可程度,与本文所提方法进行对比,表明了所提方法的有效性。

5 结束语

本文将云模型和灰色关联分析结合,提出了定性指标的方案评价方案,其主要特点有:

a) 将定性指标语义评价转换为云评价指标,除了考虑到语义评价的模糊性和不确定性,还充分考虑到了其随机性,更为客观地表示语义评价信息。同时,将云距离测度引入熵值法直接计算云评价指标权重,避免了云模型在定性定量转换时的信息损失,考虑到评价指标间的相互影响关系,采用 DEMATEL 修正指标权重,使得权重数据更为准确。

b) 将云距离测度引入灰色关联分析,解决了云评价指标计算关联度的问题,计算得出方案优劣排序。通过绘制各个方案总云图,在确定最优方案排序的基础上,更加直观地反映方案的优劣,为决策者提供更加准确的参考依据。

通过对某型号机床再制造的方案进行评价,验证了所提方法的可行性和有效性。

(下转第2359页)

器生成云滴,再通过计算云滴的平均贡献值将云模型量化,充分考虑了云模型所反映的模糊性和随机性。所以,相比云模型的传统量化方法,本文所提云滴贡献值算法确定的工程特性重要度更准确。

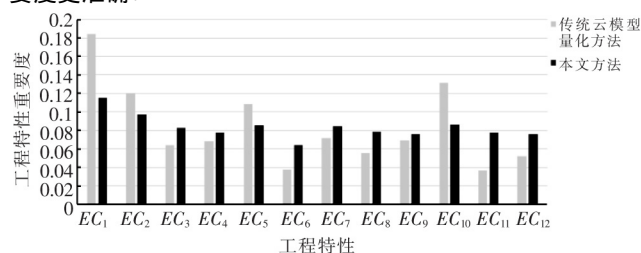


图4 传统云模型量化方法与本文方法重要度计算结果对比

5 结束语

QFD 是一种重要的产品设计质量控制技术,工程特性重要度的确定是 QFD 第一阶段的关键。本文提出一种基于云模型的 QFD 中工程特性重要度确定方法,所提方法的特点如下:

a) 采用云模型处理 QFD 中的语义评价信息,充分考虑了评价信息所包含的模糊性和随机性,从云滴分布的角度,提出一种云滴贡献值算法用于将云模型量化,使评价信息所对应云模型的量化结果更准确。

b) 考虑工程特性的技术竞争性分析,利用数学规划的方法确定最优的重要度修正因子,对基于顾客需求重要度所确定的工程特性基本重要度进行修正,使最终的工程特性重要度更加合理准确。

通过计算某企业装载机的工程特性重要度,验证了所提方法的有效性和可行性。下一步将根据所提方法开发应用程序实现数据的自动分析、计算与输出。

参考文献:

- [1] Carnevali J A, Miguel P C. Review analysis and classification of the literature on QFD—types of research difficulties and benefits [J]. *International Journal of Production Economics* 2008, 114(2): 737-754.
- [2] 李延来, 熊刚刚, 姚建明, 等. 基于竞争性评价的质量屋中工程特性最终重要度的确定方法 [J]. *中国机械工程* 2009, 20(19): 2362-2367, 2386.

(上接第 2354 页)

参考文献:

- [1] 张芳兰, 杨明朗, 刘卫东. 基于模糊 TOPSIS 方法的汽车形态设计方案评价 [J]. *计算机集成制造系统* 2014, 20(2): 276-283.
- [2] 刘文生, 吴作启, 崔铁军. 基于三角模糊数的 AHP-TOPSIS 村庄下开采接续方案优选方法研究 [J]. *计算机应用研究* 2016, 33(2): 458-461.
- [3] 林晓华, 冯毅雄, 谭建荣, 等. 基于改进 DEMATEL-VIKOR 混合模型的产品概念方案评价 [J]. *计算机集成制造系统* 2011, 17(12): 2552-2561.
- [4] Tiwari V, Jain P K, Tandon P. Product design concept evaluation using rough sets and VIKOR method [J]. *Journal Advanced Engineering Informatics* 2016, 30(1): 16-25.
- [5] Shidpour H, Cunha C D, Bernard A. Group multi-criteria design concept evaluation using combined rough set theory and fuzzy set theory [J]. *Expert Systems with Applications* 2016, 64(8): 633-644.
- [6] 李莎莎, 崔铁军, 马云东. 基于云模型和 SFT 的可靠性数据不确定性评价 [J]. *计算机应用研究* 2017, 34(12): 3656-3659.
- [7] 杨本臣, 王翠琴. P2P 中基于云模型和灰色系统理论的信任机制研究 [J]. *计算机应用研究* 2016, 33(1): 276-280.
- [8] 金璐, 覃思义. 基于云模型间贴近度的相似度量法 [J]. *计算机应用研究* 2014, 31(5): 1308-1311.
- [9] 赵坤, 高建伟, 祁之强, 等. 基于前景理论及云模型风险型多准则决策方法 [J]. *控制与决策* 2015, 30(3): 395-402.
- [10] 刘珂珂, 汪妮, 解建仓, 等. 基于熵权法的城市生态系统健康模糊评价 [J]. *武汉大学学报: 工学版* 2014, 47(6): 755-759.
- [11] 申毅荣, 解建仓. 基于熵权和 TOPSIS 法的水安全模糊物元评价模

- [3] 郭茜, 李延来, 蒲云, 等. 基于群体语义信息的顾客需求重要度确定方法 [J]. *计算机集成制造系统* 2012, 18(4): 840-848.
- [4] 王增强, 李延来, 蒲云. 基于混合语言变量的工程特性优先度确定方法 [J]. *中国机械工程* 2013, 24(20): 2797-2803.
- [5] 耿秀丽, 徐士东, 叶春明. 顾客需求驱动的产品服务系统模块选配方法 [J]. *计算机集成制造系统* 2016, 22(1): 55-61.
- [6] 王增强, 李延来, 蒲云. 产品规划中工程特性的竞争优先度分析 [J]. *计算机集成制造系统* 2013, 19(10): 2562-2571.
- [7] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器 [J]. *计算机研究与发展* 1995, 32(6): 16-18.
- [8] 周勇, 顾聪越, 程春田. 基于云模型的可信性评估模型 [J]. *计算机应用研究* 2012, 29(2): 597-600, 605.
- [9] 崔铁军, 马云东. 基于 AHP-云模型的巷道冒顶风险评价 [J]. *计算机应用研究* 2016, 33(10): 2973-2976.
- [10] 徐士东, 耿秀丽. 云模型与 TOPSIS 相结合的多属性群决策方法 [J]. *计算机应用研究* 2017, 34(10): 2964-2967.
- [11] 王坚强, 杨恶恶. 基于蒙特卡罗模拟的直觉正态云多准则群决策方法 [J]. *系统工程理论与实践* 2013, 33(11): 2859-2865.
- [12] 李延来, 唐加福, 姚建明, 等. 质量屋中工程特性改进重要度的确定方法 [J]. *计算机集成制造系统* 2007, 13(7): 1381-1387, 1394.
- [13] Chen L H, Ko W C. Fuzzy linear programming models for NPD using a four-phase QFD activity process based on the means-end chain concept [J]. *European Journal of Operational Research* 2010, 201(2): 619-632.
- [14] Chan L K, Wu Minglu. A systematic approach to quality function deployment with a full illustrative example [J]. *Omega* 2005, 33(2): 119-139.
- [15] Wang Jianqiang, Peng Lu, Zhang Hongyu et al. Method of multi-criteria group decision-making based on cloud aggregation operators with linguistic information [J]. *Information Sciences* 2014, 274(8): 177-191.
- [16] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性 [J]. *中国工程科学*, 2004, 6(8): 28-34.
- [17] 王洪利, 冯玉强. 基于云模型具有语言评价信息的多属性群决策研究 [J]. *控制与决策* 2005, 20(6): 679-681, 685.
- [18] Li Yanlai, Tang Jiafu, Luo Xinggang. An ECI-based methodology for determining the final importance ratings of customer requirements in MP product improvement [J]. *Expert Systems with Applications*, 2010, 37(9): 6240-6250.
- [19] 王坚强, 刘淘. 基于综合云的不确定语言多准则群决策方法 [J]. *控制与决策* 2012, 27(8): 1185-1190.

型研究及其应用 [J]. *系统工程* 2014, 32(7): 143-148.

- [12] 任政亮, 徐飞. 基于修正熵权算法的信息披露质量评价 [J]. *计算机应用研究* 2014, 31(5): 1437-1440, 1444.
- [13] Asad M M, Mohammadi V, Shirani M. Modeling flexibility capabilities of it-based supply chain using a grey-based DEMATEL method [J]. *Procedia Economics and Finance* 2016, 36(3): 220-231.
- [14] Baykasoğlu A, Kaplanoğlu V, Durmuşoğlu Z D U et al. Integrating fuzzy DEMATEL and fuzzy hierarchical TOPSIS methods for truck selection [J]. *Expert Systems with Applications* 2013, 40(3): 899-907.
- [15] 张莉, 冯定忠, 王林军. 产品关键特性的识别过程与分解方法 [J]. *中国机械工程* 2013, 24(15): 2025-2030.
- [16] 刘思峰, 蔡华, 杨英杰, 等. 灰色关联分析模型研究进展 [J]. *系统工程理论与实践* 2013, 33(8): 2041-2046.
- [17] 穆瑞, 张家泰. 基于灰色关联分析的层次综合评价 [J]. *系统工程理论与实践* 2008, 28(10): 125-130.
- [18] 李鹏, 刘思峰. 基于灰色关联分析和 D-S 证据理论的区间直觉模糊决策方法 [J]. *自动化学报* 2011, 37(8): 993-998.
- [19] Çelikbilek Y, Tüysüz F. An integrated grey based multi-criteria decision making approach for the evaluation of renewable energy sources [J]. *Energy* 2016, 115(9): 1246-1258.
- [20] Su Chunmei, Horng D J, Tseng M L et al. Improving sustainable supply chain management using a novel hierarchical grey-DEMATEL approach [J]. *Journal of Cleaner Production* 2016, 134(5): 469-481.
- [21] 黄国庆, 王明绪, 王国良. 效能评估中的改进熵值法赋权研究 [J]. *计算机工程与应用* 2012, 48(28): 245-248.