

云模型和证据推理决策下智慧水务建设绩效评价

阎 凤

(上海城投水务(集团)有限公司 自来水业务受理分公司, 上海 200040)

摘要:考虑到智慧水务建设绩效评价过程中信息的不确定性和传统处理云模型评价信息方法会造成不确定信息损失的问题,提出云模型结合证据推理(evidence reasoning, ER)的多属性决策方法。首先,通过采用 X 条件云生成器获取评价信息。然后,考虑专家评价信息之间存在冲突,采用改进 ER 方法对其修正并集成评价信息,得到专家对智慧水务建设绩效评价的结果。案例分析结果表明,所提方法能有效解决信息的不确定性以及评价过程中不确定信息损失的问题,为智慧水务建设绩效评价提供了新的技术途径。

关键词:智慧水务建设;绩效评价;云模型;证据推理

中图分类号:C934 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)06-0034-07

智慧水务系统是在物联网技术、云计算技术及射频识别技术等先进技术出现后,在其基础上建立起来的新型水务管理系统^[1]。与传统供水相比,智慧水务建立专用网络,实现供水系统运行、管理信息化、数字化、可视化,提高供水质量和服务水平。智慧水务已成为近几年水务行业的发展热点。智慧水务建设是一项系统工程,目前仍存在信息化建设程度不高等很多发展问题,对各地市智慧水务建设绩效进行评价有重要的实践意义。参考《智慧城市评估指标体系研究报告》,智慧水务建设绩效评价涉及定性的属性指标,评估专家更倾向于采用自然语义对绩效指标进行评价,而自然语义本身具有一定的模糊性和随机性。因此,智慧水务建设绩效评价具有随机性、模糊性的特点。

云模型评估方法于 20 世纪 90 年代被提出,具有反映事物的模糊性和随机性的特点,而被广泛应用于绩效评价中^[2]。文献[3]提出了一种基于云模型的多属性决策方法。文献[4]提出了一种基于云模型的蒙特卡罗多属性决策框架,用于地下水污染修复策略的选择。文献[5]将云模型与熵权法结合,对多属性决策问题进行决策分析。以上研究均采用加权集成算子对云评价信息进行处理,具有决策补偿性的缺点,往往会降低评价结果的准确性。文献[6]提出了一种基于云模型和熵权法的综合评估模型,用于对配电网项目融资租赁风险进行评

估,能够实现定性概念与定量数据之间的自由转换,同时表征风险的随机性和模糊性。文献[7]采用组合赋权法融合不确定层次分析法-集对分析的主观权重和 CRITIC(criteria importance though intercriteria correlation)法的客观权重实现对风险指标的合理赋权,建立基于云模型的风险评估模型确定风险等级。证据推理(evidence reasoning, ER)方法将评价专家的经验偏好转化到同一识别框架中,具有无需先验概率、推理逻辑简单等优点,是一种处理不确定评价信息集成问题的有效方法^[8]。考虑到专家之间的知识背景及偏好存在不同,专家之间的评价信息往往会存在高度冲突问题。若直接使用 ER 对评价信息进行集成处理,可能会出现与事实相悖的结果。针对高度冲突信息的处理问题,本文采用文献[9]提出的余弦相似度的证据冲突度量方法对 ER 进行改进,通过计算得出证据权重对原始评价信息进行修正,从而达到缓解冲突的目的。

为解决智慧水务建设绩效评价中语言信息的模糊性和不确定性问题,同时有效处理专家评价之间的冲突融合。本文提出通过采用 X 条件云生成器获取评价信息,将不同专家的语言评价价值转化为云决策矩阵;然后考虑不同专家知识体系、逻辑习惯存在的冲突性和差异性问题,采用改进 ER 方法对其修正并集成评价信息,得到专家对智慧水务建设绩效评价的结果。最后,采用所提方法对某智

收稿日期:2022-11-09

基金项目:教育部人文社会科学研究规划基金(19YJA630021)。

作者简介:阎凤(1982—),女,上海人,上海城投水务(集团)有限公司自来水业务受理分公司,工程师,硕士,研究方向为水务机电。

慧水务建设项目绩效进行评价。

1 证据理论介绍

假设专家集 $A=\{a_1,\cdots,a_l,\cdots,a_L\}$,其中 $a_l(1\leq l\leq L)$,评价指标集 $E=\{e_1,\cdots,e_i,\cdots,e_I\}$,指标权重集 $w=\{w_1,\cdots,w_i,\cdots,w_I\}$,其中 $w_i(1\leq i\leq I)$ 对应评价指标 e_i 的权重,满足 $0\leq w_i\leq 1, \sum_{i=1}^I w_i=1$ 。假设共有语义评价等级 N 个, $H=\{H_1,\cdots,H_n,\cdots,H_N\}$ 表示对 e_i 进行评价的等级,各评价指标 e_i 被评价为 H_n 的信任度表示为 $\beta_{n,i}(a_l)$,满足 $0\leq \beta_{n,i}(a_l)\leq 1$ 和 $\sum_{n=1}^N \beta_{n,i}(a_l)=1$,则专家 a_l 对指标 e_i 的评价信任框架可用 $S[a_l(e_i)]=\{(H_n,\beta_{n,i}(a_l))\}$ 表示,即对各专家的评价信息,可通过决策矩阵 $D=\{S[a_l(e_i)]\}_{l\times i}$ 表示。

假设概率分派函数 $m_{n,i}$ 表示第 i 个指标 e_i 支持广义指标 y 被评价为 H_n 的支持度。剩余概率分派函数 $m_{H,i}$ 表示第 i 个指标 e_i 对广义指标 y 未被分派给任何一个评价等级的支持度,分别记为

$$m_{n,i}(a_l)=w_i\beta_{n,i}(a_l) \tag{1}$$

$$m_{H,i}(a_l)=1-\sum_{n=1}^N m_{n,i}(a_l)=1-w_i\sum_{n=1}^N \beta_{n,i}(a_l)=\bar{m}_{H,i}(a_l)+\tilde{m}_{H,i}(a_l) \tag{2}$$

式中: $\bar{m}_{H,i}(a_l)=1-w_i$ 为由于权重而未分派的剩余概率函数; $\tilde{m}_{H,i}(a_l)=w_i[1-\sum_{n=1}^N \beta_{n,i}(a_l)]$ 为由于无知而未分派的概率函数,是由于不完全评价引起的。

各指标评价等级信任度为

$$\beta_n(a_l)=\frac{m_{n,\Pi}(a_l)}{1-\bar{m}_{H,\Pi}(a_l)} \tag{3}$$

$$\beta_H(a_l)=\frac{\tilde{m}_{n,\Pi}(a_l)}{1-\bar{m}_{H,\Pi}(a_l)} \tag{4}$$

式中: $\beta_n(a_l)$ 为专家 a_l 对广义指标 y 的评价为 H_n 的信任度; $\beta_H(a_l)$ 为未被分配给任何评价等级的信任度,即信息的无知程度。

假设统一识别框架下共设 N 个评价等级,且对用的评价等级效用度为 u_n ,且 $H_1<H_2<\cdots<H_N$,则对最大、最小和平均效用值分别为

$$u_{\max}(a_l)=\sum_{n=1}^{N-1}\beta_n(a_l)u_n+\{[\beta_N(a_l)+\beta_H(a_l)]u_N\} \tag{5}$$

$$u_{\min}(a_l)=\sum_{n=2}^N\beta_n(a_l)u_n+\{[\beta_1(a_l)+\beta_H(a_l)]u_1\} \tag{6}$$

$$u_{\text{avg}}(a_l)=\frac{u_{\max}(a_l)+u_{\min}(a_l)}{2} \tag{7}$$

2 智慧水务建设绩效评价模型

本文考虑到绩效评价信息的模糊性和随机性,创新性地将云模型结合 ER 进行智慧水务建设绩效评价。首先,专家根据自然语义评价等级和评价等级相对应的离散数值,对绩效指标进行评价。其次,通过黄金分割法将语义标度转化为云模型,并采用熵权法确定绩效指标权重。然后,利用评价等级离散数值,通过 X 条件正向云发生器,得出绩效评价指标的评价等级隶属度,再通过隶属度转换公式得到绩效指标的信任度函数。最后,运用 ER 方法对绩效评价信息进行修正和集结,从而得出最终绩效评估值。

2.1 语义评价转换为云模型

云模型最主要的性质是正态性,期望 Ex 、熵 En 、超熵 He 是用来描述云模型的 3 个特征数字,一个云模型通常可记作 $\hat{C}=(Ex,En,He)$ 。其中,期望 Ex 在论域空间中代表 C 的点,是 C 在论域 U 中的中心点;熵 En 代表一个 C 的可度量粒度,通常熵越大,粒度越大,还反映 C 的不确定性,表示在论域空间可以被定性概念 C 接受的取值范围,即模糊度,是对 C 的度量;超熵 He 表示 En 的熵,是 En 的不确定性度量,反映定性概念值样本出现的随机性,揭示模糊性和随机性的关联。

设有 N 个评价等级 $H=\{H_1,\cdots,H_n,\cdots,H_N\}$ (N 一般为奇数),有效论域 $U=[X_{\min},X_{\max}]$,采用黄金分割法生成 N 朵云,与相应的语义等级一一对应。一般而言,中间一朵云 $\hat{C}_0=(Ex_0,En_0,He_0)$,左右相邻的云分别为 $\{\hat{C}_{-1}=(Ex_{-1},En_{-1},He_{-1}),\hat{C}_1=(Ex_1,En_1,He_1),\hat{C}_{-2}=(Ex_{-2},En_{-2},He_{-2}),\hat{C}_2=(Ex_2,En_2,He_2),\cdots,\hat{C}_{\frac{n-1}{2}}=(Ex_{\frac{n-1}{2}},En_{\frac{n-1}{2}},He_{\frac{n-1}{2}}),\hat{C}_{\frac{n+1}{2}}=(Ex_{\frac{n+1}{2}},En_{\frac{n+1}{2}},He_{\frac{n+1}{2}})\}$ 。采用黄金分割法^[12]生成 5 朵云的计算方法见表 1。

表 1 黄金分割法生成 5 朵云的计算方法

云模型	Ex	En	He
$\hat{C}_2=(Ex_2,En_2,He_2)$	$X_{\max}$	$En_1/0.618$	$He_{-1}/0.618$
$\hat{C}_1=(Ex_1,En_1,He_1)$	$Ex_0+0.382(X_{\max}-Ex_0)$	$0.382(X_{\max}-X_{\min})/6$	$He_0/0.618$
$\hat{C}_0=(Ex_0,En_0,He_0)$	$(X_{\max}+X_{\min})/2$	$0.618En_1$	给定 He_0
$\hat{C}_{-1}=(Ex_{-1},En_{-1},He_{-1})$	$Ex_0+0.382(X_{\max}-Ex_0)$	$0.382(X_{\max}-X_{\min})/6$	$He_0/0.618$
$\hat{C}_{-2}=(Ex_{-2},En_{-2},He_{-2})$	$X_{\min}$	$En_1/0.618$	$He_{-1}/0.618$

2.2 确定绩效评价指标权重

专家对绩效指标的评价信息往往具有不确定性,且各项绩效指标的重要程度不同,指标权重的合理分配对评价结果有着重要的影响。熵反映信息的不确定性,熵值越小,评价指标的离散程度越大,表明该指标对综合评价的影响越大,权重也越大。本文采用熵权法获取客观指标权重,具体步骤如下。

步骤 1: 设 $\hat{e}_i^* = (Ex_i^*, En_i^*, He_i^*)$ 是指标 $e_i(1 \leq i \leq I)$ 下的理想值, $\hat{e}_{li} = (Ex_{li}, En_{li}, He_{li})$ 是第 $l(1 \leq l \leq L)$ 个对第 i 个绩效指标评价的云评价值, $d(e_{li}, \hat{e}_i^*)$ 表示该评价值到理想属性之间的云距离测度,距离越大,两多云之间的相似度就越小。理想值 $\hat{e}_i^* = (Ex_i^*, En_i^*, He_i^*)$ 和 $\hat{e}_{li} = (Ex_{li}, En_{li}, He_{li})$ 通过正向云发生器分别生成 K_1, K_2 个云滴 $drop_1 = [x_{k1}^*, \mu_{k1}^*(x)](1 \leq k_1 \leq K_1)$ 和 $drop_2 = [x_{lk2}, \mu_{lk2}(x)](1 \leq k_2 \leq K_2)$, 计算各云滴之间的距离^[13]:

$$d(e_{li}, \hat{e}_i^*) = d(drop_1, drop_2) = \frac{1}{K_2} \sum_{k=1}^{K_2} \sqrt{(x_{k1}^* - x_{lk2})^2 + [\mu_{k1}^*(x) - \mu_{lk2}(x)]^2}$$

(8)

步骤 2: 对云距离测度进行规范化处理。

$$p_{li} = \frac{d(e_{li}, \hat{e}_i^*)_{li}}{\sum_{l=1}^L d(e_{li}, \hat{e}_i^*)_{li}}$$

(9)

步骤 3: 求属性 e_i 下的熵值 s_i 。

$$s_i = -k \sum_{l=1}^L p_{li} \ln p_{li}$$

(10)

式中: k 为大于零的常数, $s_i > 0$ 。对于指标 e_i , 如果

p_{li} 全部相等, 即 $p_{li} = 1/L, (l=1, 2, \dots, L)$, 则 s_i 取得极大值, 即 $s_i = k \ln L$, 本文取 $k = 1/\ln L$, 则 $0 \leq s_i \leq 1$ 。

步骤 4: 计算各绩效指标 e_i 下的偏差程度系数 γ_i 。

$$\gamma_i = 1 - s_i$$

(11)

步骤 5: 计算各绩效指标权重 w_i 。

$$w_i = \frac{\gamma_i}{\sum_{i=1}^I \gamma_i}$$

(12)

2.3 基于云模型获取评价等级的信任度函数

将专家对绩效指标评价使用的自然语义描述为差、较差、一般、较好、好 5 种, 用离散数值 $\alpha(\alpha = 1, 2, \dots, 10)$ 表示每种语义的离散程度。设与各评价等级相对应的离散数值范围 $H = \{H_1, H_2, \dots, H_5\} = \{<3, 3 \sim 5, 5 \sim 7, 7 \sim 9, >9\}$ 。对专家语义评价信息进行定量处理, 并结合评价等级对应的离散数值的划分, 运用云模型表示每个评价等级, 将评价等级与连续的语言值相对应, 并利用 X 条件正向云发生器建立评价等级云评价模型, 如图 1 所示。

通过建立的评价等级云评价模型, 可以生成每个绩效指标的评价等级所对应的离散数值的云滴, 以及每个绩效指标评价等级的隶属度。针对绩效指标 e_i , 根据专家 $p(p=1, 2, \dots, P)$ 给出的评语, 利用 X 条件正向云发生器获取该绩效指标对应评价等级的隶属度 $\mu_i^p(H_n)$, 对获得的隶属度进行归一化处理, 可以得出专家 p 对绩效指标 e_i 的评价等级的信任度函数。

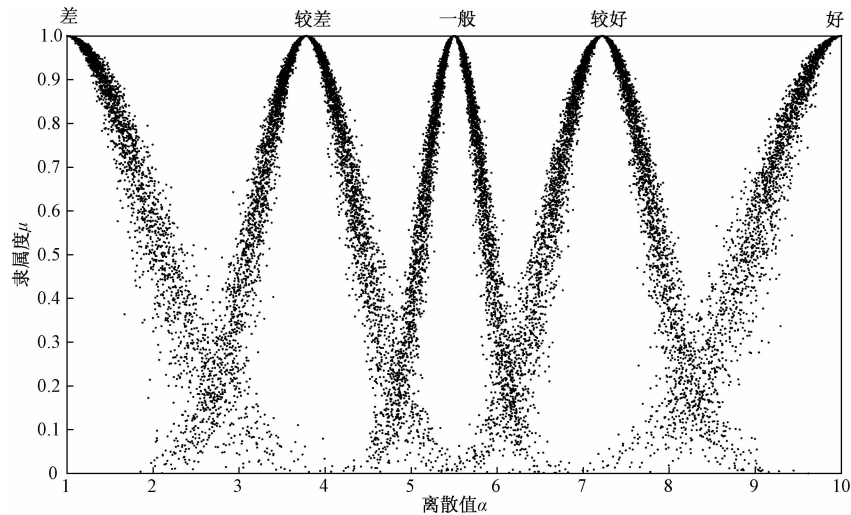


图 1 评价等级云评价模型

$$\beta_i^p(H_n) = \frac{\mu_i^p(H_n)}{\sum_{n=1}^5 \mu_i^p(H_n)} \quad (13)$$

2.4 证据权重计算

设同一识别框架下两个 BPA 分别为 $m_{n,i}(a_\epsilon)$ 、 $m_{n,i}(a_\tau)$, 其矢量形式可表示为 $\mathbf{m}_i(a_\epsilon)$ 、 $\mathbf{m}_i(a_\tau)$, 则两证据的余弦相似度为

$$c[\mathbf{m}_i(a_\epsilon), \mathbf{m}_i(a_\tau)] = \frac{\langle \mathbf{m}_i(a_\epsilon), \mathbf{m}_i(a_\tau) \rangle}{\|\mathbf{m}_i(a_\epsilon)\| \cdot \|\mathbf{m}_i(a_\tau)\|} \quad (14)$$

式中:

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{m}_i(a_\epsilon), \mathbf{m}_i(a_\tau) \rangle &= \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{n=1 \\ h \neq r}}^N \sum_{\epsilon=1}^L \sum_{\substack{r=1 \\ \epsilon \neq \tau}}^L m_{n,i}(a_\epsilon) m_{r,i}(a_\tau); \\ \|\mathbf{m}_i(a_\epsilon)\| &= \sqrt{m_{1,i}(a_\epsilon)^2 + m_{2,i}(a_\epsilon)^2 + \dots + m_{H,i}(a_\epsilon)^2}; \\ \|\mathbf{m}_i(a_\tau)\| &= \sqrt{m_{1,i}(a_\tau)^2 + m_{2,i}(a_\tau)^2 + \dots + m_{H,i}(a_\tau)^2}. \end{aligned}$$

当 $c[\mathbf{m}_i(a_\epsilon), \mathbf{m}_i(a_\tau)]$ 值越接近 0 时, 则表示两证据冲突程度越大; 当 $c[\mathbf{m}_i(a_\epsilon), \mathbf{m}_i(a_\tau)]$ 越接近 1 时, 则表示两证据间的冲突程度越小。

为了便于表示将 $c[\mathbf{m}_i(a_\epsilon), \mathbf{m}_i(a_\tau)]$ 简写成 $c_{\text{BPA}}(\epsilon\tau)$, 在证据系统中, 第 l 个专家得到的支持程度为 $\text{sup}(m_l)$, 则专辑 l 的评价信息可信度为

$$w'_l = \text{Crd}_l = \frac{\text{Sup}(m_l)}{\text{Max}[\text{Sup}(m_l)]} \quad (15)$$

式中: $\text{Sup}(m_l) = \sum_{p=1, l \neq p}^L c_{\text{BPA}}(lp)$ 。显然, $\text{Crd}(m_l)$ 满足 $\sum_{l=1}^L \text{Crd}(m_l) = 1$, 即 $\text{Crd}(m_l)$ 可作为证据 m_l 的权重 w'_l 。

根据证据权重对初始证据进行修正如下:

$$m'_{n,i}(a_l) = w'_l m_{n,i}(a_l) \quad (16)$$

2.5 绩效指标评价信息的集成

本文提出一种云模型结合 ER 的智慧水务建设绩效评价方法。专家采用语义评价的形式对绩效指标进行评价, 并在给定论域 $[X_{\min}, X_{\max}]$ 的基础上, 运用黄金分割法建立云评价模型, 实现定性信息到定量信息之间的转化, 其具体步骤如下。

步骤 1: 建立绩效指标体系。各专家依据评价等级的划分标准, 对各绩效指标进行语义评价, 并给出评价等级对应的离散值 α 。在给定论域 $U = [X_{\min}, X_{\max}]$ 的基础上, 运用黄金分割法获得每个评价等级的云模型。为保证评价结果的客观性, 采用式(8)~式(12)确定各绩效指标权重。在专家给出各绩效指标的评价等级离散值 α 的基础上, 利用 X 条件正向云发生器计算各绩效指标对应评价等

级的隶属度。

步骤 2: 根据式(13)计算式各绩效指标评价等级的信任度函数, 式(1)、式(2)计算各绩效指标的 BPA 和剩余 BPA。集结每个专家的绩效指标评价信息, 并根据式(3)、式(4)得出各专家对绩效评价的等级信任度。

步骤 3: 在步骤 2 得出各专家的绩效评价等级信任度的基础上, 通过式(1)、式(2)计算各评价专家绩效评价信息的 BPA, 再运用式(14)计算各个专家间的评价信息相似度, 采用式(15)计算证据权重, 并利用式(16)修正各专家绩效评价信息的 BPA。

步骤 4: 再次对绩效评价信息进行集成, 得出绩效的综合评价信息。运用式(3)、式(4)计算绩效评价的综合评价等级信任度。

步骤 5: 设立各评价等级的效用值, 根据平均效用值的大小评价绩效水平。

3 案例分析

随着城市供水规模的不断扩大, 供水管理的难度逐渐增加, 供水领域实施智慧水务是保障供水安全, 提升管理能力, 增加经济效益的重要举措。本文以陕西铜川供水有限责任公司的智慧水务建设项目为例进行分析, 它位于新区长虹北路, 为陕西省桃曲坡水库管理局下辖的供水企业, 主要承担了铜川新区城市供水和华能电厂等企业的供水任务, 主要供水设施为新区净水厂和城市供水管网, 设计供水能力 5 万 m^3/d , 日均供水量 3.5 万 m^3 ^[14]。

陕西铜川供水有限责任公司从以下 4 个方面对智慧水务进行了建设: ①建立管网 GIS 系统, 即时掌握管网信息, 服务相关单位的施工; ②建设短信水量、缴费信息平台, 减少管理员的工作量和用户的时间成本; ③安装使用电磁智能水表, 降低企业的抄表水量损失, 提高经济效益; ④建设管网分区控制、监测的设备, 将事故影响降低到最小化。

在不考虑专家权重的情况下, 5 名专家($a_1, a_2, \dots, a_5$)基于表 2 中的 11 项指标($e_1, e_2, \dots, e_{11}$)对该供水公司智慧水务的建设绩效进行评价, 评价信息见表 3。企业设定 5 个语义评价等级 H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 , 分别为差、较差、一般、较好和好, 其评价等级的效用度分别为 0, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 设有效论域 $U = [1, 10]$, 根据黄金分割法生成与语义等级相对应的 5 朵云, 给定 $H_{\alpha_0} = 0.809$, 结果见表 4。

表 2 智慧水务建设绩效评价指标体系

一级指标	智慧基础					智慧应用				智慧服务	
二级指标	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}	e_{11}
	智能终端	网络环境	技术应用	支撑平台	保障环境	生产控制 管理能力	生产运行 管理能力	管网管理 能力	综合管控 能力	客户服务 能力	企业服务 能力

表 3 评价专家 a_i 对 D 公司智慧水务建设绩效的评价信息

a_i	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}	e_{11}
a_1	$(H_2, 3),$ $(H_4, 8)$	$(H_3, 5),$ $(H_4, 8)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 6)$	$(H_2, 3),$ $(H_3, 6)$	$(H_3, 7),$ $(H_4, 8)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 6)$	$(H_3, 7),$ $(H_4, 9)$	$(H_2, 5),$ $(H_3, 8)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 6)$	$(H_3, 7),$ $(H_4, 8)$	$(H_2, 5),$ $(H_3, 6)$
a_2	$(H_4, 5),$ $(H_5, 10)$	$(H_3, 7),$ $(H_4, 8)$	$(H_4, 9),$ $(H_5, 10)$	$(H_4, 8),$ $(H_5, 10)$	$(H_4, 8),$ $(H_5, 10)$	$(H_3, 7),$ $(H_4, 8)$	$(H_3, 6),$ $(H_4, 8)$	$(H_4, 8),$ $(H_5, 10)$	$(H_3, 7),$ $(H_4, 8)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 6)$	$(H_1, 2),$ $(H_2, 4)$
a_3	$(H_2, 5),$ $(H_3, 6)$	$(H_1, 3),$ $(H_2, 4)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 5)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 6)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 6)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 7)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 6)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 6)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 6)$	$(H_1, 3),$ $(H_2, 5)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 7)$
a_4	$(H_3, 7),$ $(H_4, 8)$	$(H_3, 6),$ $(H_4, 7)$	$(H_3, 8),$ $(H_4, 9)$	$(H_3, 6),$ $(H_4, 8)$	$(H_3, 7),$ $(H_4, 9)$	$(H_3, 6),$ $(H_4, 8)$	$(H_3, 7),$ $(H_4, 8)$	$(H_3, 7),$ $(H_4, 8)$	$(H_3, 6),$ $(H_4, 8)$	$(H_3, 6),$ $(H_4, 8)$	$(H_3, 7),$ $(H_4, 8)$
a_5	$(H_1, 3),$ $(H_2, 5)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 5)$	$(H_1, 2),$ $(H_2, 3)$	$(H_1, 2),$ $(H_2, 4)$	$(H_1, 2),$ $(H_2, 3)$	$(H_1, 3),$ $(H_2, 5)$	$(H_1, 3),$ $(H_2, 5)$	$(H_1, 3),$ $(H_2, 4)$	$(H_1, 2),$ $(H_2, 4)$	$(H_2, 4),$ $(H_3, 6)$	$(H_2, 3),$ $(H_3, 6)$

表 4 评价等级定义

等级	离散数值范围	云评价信息
H_1 (差)	<3	$(1, 0.927, 0.131)$
H_2 (较差)	$3 \sim 5$	$(3.781, 0.573, 0.081)$
H_3 (一般)	$5 \sim 7$	$(5.5, 0.354, 0.05)$
H_4 (较好)	$7 \sim 9$	$(7.219, 0.573, 0.081)$
H_5 (好)	>9	$(10, 0.927, 0.131)$

假设各指标的理想等级均为好,其对应的云评价值为 $\hat{e}_i^* = (1, 33.379, 0.131)$,根据式(8)计算各语义评价等级对应的云评价到理想值之间的距离,并利用式(9)对各云距离测度进行规范化处理,最后由式(12)可得出智慧水务建设绩效的指标权重,见表 5。

根据各专家给出的评价信息中的离散数值 α ,利用 X 条件正向云发生器获取各智慧水务建设绩效评价对应评价等级的隶属度,并采用式(13)计算各评价指标的评价等级信任度函数,各专家的指标评价信息信任度函数结果见表 6。

通过计算得出各评价指标的信任度函数后,根据式(1)、式(2)计算每位专家对各项评价指标的 BPA 和剩余 BPA,而后,依次对每位评价专家给出的指标评价信息进行集结处理,再运用式(3)、式(4)计算得出各评价专家对陕西 D 供水有限责任公司智慧水务建设水平评价信息的评价等级信任度,见表 7。

根据 ER 集成方法得出各评价专家对 D 公司智慧水务建设绩效的综合评价信任度后,再次运用式(1)、式(2)计算每个专家评价的 BPA。而后,通过余弦相似度式(14)、式(15)计算各专家间评价信息的

相似度以及证据权重,最后采用式(16)对原通过式(1)、式(2)计算出的每个专家的 BPA 进行修正。修正后再次运用 ER 集成修正后的各专家的评价信息 BPA,并采用式(3)、式(4)计算 D 公司智慧水务建设绩效的综合评价信任度。采用效用函数式(5)~式(7)计算平均效用值。根据平均效用值的大小评价该供水公司智慧水务建设绩效水平,其平均效用值为 0.578,可知该供水公司智慧水务建设水平为一般。

为证明本文所提方法的有效性,将本文所提方法与传统云模型集成方法做对比。以本文案例提供的评价信息为基础,采用传统的云模型加权集成方法对各专家的评价信息进行集成,得出 D 公司智慧水务的建设绩效的评价云为 $(6.404, 0.496, 0.068)$,为一般。虽然传统加权平均算子集结得出的结果也为一般,但其数值更加接近较好水平,与本文方法得出的结果存在差异,这是由于加权集算子具有决策补偿性,在集结过程中会造成不确定信息损失的问题。本文提出云模型结合 ER 的绩效水平评价方法,既考虑到了指标评价信息的不确定性,又有效解决了评价信息集结过程中不确定信息损失的问题,提高了评价的合理性。

4 结论

考虑到智慧水务建设绩效评价过程中的不确定性和传统云模型评价信息处理方法会造成不确定信息损失的问题,提出云模型结合 ER 的绩效评价方法。所提方法特点如下:

1)考虑到智能水务建设绩效评价过程中的模糊性和随机性,采用云模型来表达专家的评估信息。

表 5 智慧水务建设水平指标权重

ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	ω_5	ω_6	ω_7	ω_8	ω_9	ω_{10}	ω_{11}
0.071	0.031	0.124	0.124	0.111	0.088	0.084	0.124	0.088	0.128	0.028

表 6 各专家对各评价指标评价的信任度函数

a_l	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	e_7	e_8	e_9	e_{10}	e_{11}
a_1	$(H_1,0.333), (H_2,0.333), (H_4,0.333)$	$(H_2,0.333), (H_3,0.333), (H_4,0.333)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_1,0.333), (H_2,0.333), (H_3,0.333)$	$(H_3,0.498), (H_4,0.502)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_3,0.499), (H_4,0.501)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_3,0.5), (H_4,0.5)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$
a_2	$(H_3,0.332), (H_4,0.334), (H_5,0.334)$	$(H_3,0.498), (H_4,0.502)$	$(H_4,0.499), (H_5,0.501)$	$(H_4,0.5), (H_5,0.5)$	$(H_4,0.5), (H_5,0.5)$	$(H_3,0.498), (H_4,0.502)$	$(H_3,0.5), (H_4,0.5)$	$(H_4,0.5), (H_5,0.5)$	$(H_3,0.498), (H_4,0.502)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_1,0.5), (H_2,0.5)$
a_3	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_1,0.5), (H_2,0.5)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_2,0.334), (H_3,0.332), (H_4,0.334)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_1,0.333), (H_2,0.333), (H_3,0.334)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$
a_4	$(H_3,0.498), (H_4,0.502)$	$(H_3,0.5), (H_4,0.5)$	$(H_3,0.5), (H_4,0.5)$	$(H_3,0.5), (H_4,0.5)$	$(H_3,0.332), (H_4,0.333), (H_5,0.334)$	$(H_3,0.5), (H_4,0.5)$	$(H_3,0.498), (H_4,0.502)$	$(H_3,0.498), (H_4,0.502)$	$(H_3,0.5), (H_4,0.5)$	$(H_3,0.5), (H_4,0.5)$	$(H_3,0.5), (H_4,0.5)$
a_5	$(H_1,0.333), (H_2,0.333), (H_3,0.334)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_1,0.5), (H_2,0.5)$	$(H_1,0.5), (H_2,0.5)$	$(H_1,0.5), (H_2,0.5)$	$(H_1,0.333), (H_2,0.334), (H_3,0.333)$	$(H_1,0.333), (H_2,0.334), (H_3,0.333)$	$(H_1,0.5), (H_2,0.5)$	$(H_1,0.5), (H_2,0.5)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$	$(H_2,0.5), (H_3,0.5)$

表 7 各专家对 D 公司智慧水务建设绩效评价信息的评价等级信任度

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
$(H_2,0.103), (H_3,0.405), (H_4,0.228)$	$(H_1,0.011), (H_2,0.065), (H_3,0.208), (H_4,0.341), (H_5,0.247)$	$(H_1,0.318), (H_2,0.315), (H_3,0.414), (H_4,0.066)$	$(H_2,0.148), (H_3,0.398), (H_4,0.227), (H_5,0.094)$	$(H_1,0.181), (H_2,0.306), (H_3,0.128)$

2)考虑到传统处理云模型评价信息方法会造成不确定信息损失的问题,采用 ER 方法集结不确定评价信息,提高了评价结果的准确性。

所提方法能有效解决指标评价信息的不确定性以及评价过程中不确定信息损失的问题。本文在评价过程中未考虑到专家权重,未来将研究专家权重未知条件下的智慧水务建设绩效评价问题。

参考文献

[1] 吴巍. 智慧水务系统在城市供水中的应用[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊),2018(3):152-153.

[2] 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):16-21.

[3] 徐选华,吴慧迪. 基于改进云模型的语言偏好信息多属性大群体决策方法[J]. 管理工程学报,2018,32(1):117-125.

[4] SONG W,ZHU J J, A multistage risk decision making method for normal cloud model considering behavior characteristics [J]. Applied Soft Computing, 2019 (78):

393-406.

[5] HUANG Z Y. Toward a deeper understanding of the adoption decision for interorganizational information systems (IOS):an investigation of Internet EDI(I-EDI)[D]. Memphis:The University of Memphis,2003:54-55.

[6] 姚建华,姚朵朵,蔡金明,等. 基于云模型和熵权法的配电网项目融资租赁风险评估[J]. 科学技术与工程,2017,17(18):226-230.

[7] 谷雨轩,徐常凯,倪彬. 基于组合赋权云模型的阻力伞保障风险评估[J]. 科学技术与工程,2022,22(24):10787-10795.

[8] YAO R, YANG Y, LI B. A holistic method to assess building energy efficiency combining D-S theory and the evidential reasoning approach[J]. Energy Policy,2012,45(11):277-285.

[9] 耿秀丽,谷玲玲. 基于改进 ER 的生鲜冷链物流服务质量评估方法[J]. 计算机应用研究,2020,37(5):1460-1464.

[10] LU H W, REN L X, CHEN Y Z, et al. A cloud model based multi-attribute decision making approach for selection and evaluation of groundwater management schemes [J]. Journal of Hydrology,2017,555:881-893.

[11] YANG J B,XU D L. On the evidential reasoning algorithm for multiple attribute decision analysis under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part A Systems & Humans, 2002, 32(3):289-304.

[12] 耿秀丽,董雪琦,徐士东. 灰色关联分析与云模型集成的方案评价方法[J]. 计算机应用研究,2018(8):117-120,125.

[13]

DOS SANTOS B M,GODOY L P,CAMPOS L M S.Per-
formance evaluation of green suppliers using Entropy-
TOPSIS-F[J]. Journal of Cleaner Production,2019,207:
498-509.

[14]

庞晓莹,李七顺.智慧水务在供水企业管理中的应用[J].
陕西水利,2022(10):104-105.

Performance Evaluation of Smart Water Construction Based on Cloud Model and ER

YAN Feng

(Tap Water Business Acceptance Branch of Shanghai Chengtou Water (Group) Co.,Ltd.,Shanghai 200040,China)

Abstract: Considering the uncertainties in the process of performance evaluation and the loss of uncertain information caused by traditional cloud model evaluation methods, a smart water construction performance evaluation method based on cloud model and improved evidential reasoning is proposed. Firstly, the evaluation information is obtained by using X conditional cloud generator. Then, considering the conflict between expert evaluation information, the improved ER method is used to revise and integrate the evaluation information, and the results of expert performance evaluation for green suppliers are obtained. The results of case study show that the proposed method can effectively solve the uncertainty of evaluation information and the loss of uncertain information in the evaluation process. The applicability of the algorithm is verified, which provides a new technical way for the performance evaluation of smart water construction.

Keywords: smart water construction;performance evaluation;cloud model;evidence reasoning