

## 多指标决策中隶属度转换 算法及其应用

刘开第<sup>1</sup> 庞彦军<sup>1</sup> 栗文国<sup>1</sup>

**摘要** 隶属度转换涉及了众多应用领域,但是,目前已有的隶属度转换算法仍然存在如下问题:给出的转换算法不能揭示指标隶属度中哪部分对目标分类有用,从而导致了指标隶属度中原本对目标分类不起作用的冗余数值也被用于计算目标隶属度.针对已有隶属度转换算法中存在的冗余数据问题,本文从对目标分类的角度设计了一种滤波器,可以识别对目标分类不起作用的冗余的指标隶属度和指标隶属度中的冗余数值,并从指标隶属度中分离出对目标分类起作用的“有效值”,参与计算目标隶属度;最终建立实现由指标隶属度到目标隶属度转换的一般算法.应用实例说明了转换的全过程.

**关键词** 多指标决策, 区分权, 有效值, 可比值, 隶属度转换  
**中图分类号** N945.25

### Membership Transforming Algorithm in Multi-index Decision and Its Application

LIU Kai-Di<sup>1</sup> PANG Yan-Jun<sup>1</sup> LI Wen-Guo<sup>1</sup>

**Abstract** Membership transformation has many practical applications. Existing membership transforming algorithms have some essential problems. For example, they cannot show which parts in the index membership are useful for the objective classification or which parts are of no use. Therefore, the redundant data in the index membership that do not contribute to objective classification are also used to calculate the objective membership. To overcome this problem, we design a kind of filter from the viewpoint of objective classification to identify and remove those redundant index memberships as well as the redundant data in the index membership, and extract the “available values” for the objective classification. A general transforming algorithm from index membership to the objective membership can be obtained. An application example is introduced to illustrate the transforming process.

**Key words** Multi-index decision, distinguish weight, available value, comparable value, membership transformation

多指标决策系统的决策指标体系通常是一个递阶层次结构,底层指标关于  $P$  个等级的隶属度是可确定的.决策的目的是确定顶层总目标关于  $P$  个等级的隶属度.决策过程是从底层指标隶属度开始,逐一计算相邻上层中每一项指标的  $P$  个等级隶属度;并且,在每一个层次上的每一种计算,都是在实现一种从“指标隶属度到目标隶属度”的转换.

比如,文献[1]给出的如表1(见下页)所示的某工程项目的风险评价矩阵是一个  $L = 4$  层结构,底层指标关于  $P$  个等级的隶属度由领域专家按“头脑风暴”方法确定;上层任一指标下辖的下层相关指标的重要性权重由专家按层次分析法

(Analytical hierarchy process, AHP) 确定<sup>[2]</sup>.决策的目的是确定工程项目风险的等级隶属度.决策过程包括  $L - 1 = 3$  个计算层次,每个层次上都至少经过一次从“指标隶属度到目标隶属度”的转换.

又如,环评中水质评价的评价矩阵是一个二层结构,底层指标是各种污染指标的监测值,其  $P = 5$  个等级隶属度可根据水质分级“标准”(国家统一规定)通过构造隶属函数获得.决策的目的是确定水环境质量关于  $P = 5$  个等级的隶属度,即实现从指标监测值隶属度到水样本隶属度的转换,这也是一种从“指标隶属度到目标隶属度”的转换.

如果把水环境、大气环境、土壤环境等作为某区域自然环境的子环境(各子环境都分为  $P$  个等级),那么区域自然环境质量评价的评价矩阵是一个  $L = 3$  层结构.决策的目的是确定区域自然环境质量的等级隶属度.决策过程是从底层指标监测值隶属度开始,经过  $L - 1 = 2$  个计算层次,在每个层次上至少经过一次从“指标隶属度到目标隶属度”的转换.

再如,混凝土桥梁耐久性评估的评价矩阵是一个三层结构,底层指标是诸如裂缝宽度、钢筋锈蚀速度等若干耐久性指标的检测值,其关于  $P$  个耐久性等级的隶属度,可根据领域中规定的耐久性指标的分级“标准”用构造隶属函数的方法获得;中间层是柱、板、基础等混凝土构件.决策的目的是确定混凝土桥梁的耐久性等级,需经过两个层次上的若干隶属度转换.

上述问题涉及故障诊断、风险分析、质量评价、管理、工业过程等众多应用领域,并且,隶属度转换在决策中起着实质性的关键作用.由于每一环节上的隶属度转换,都是在实现一种从“指标隶属度到目标隶属度”的转换,所以,当抽象掉转换过程中的具体内容后,都可归结为下述模型:

某多指标系统中,影响目标  $Q$  状态的有  $m$  种指标,每种指标都被划分为  $P$  个等级(也称为类),用  $C_1, \dots, C_p$  表示,且  $C_k$  级优于  $C_{k+1}$  级.如果  $j$  指标属于  $C_k$  类的隶属度  $\mu_{jk}(Q)$  ( $j = 1, \dots, m; k = 1, \dots, P$ ) 已知,且  $\mu_{jk}(Q)$  满足

$$0 \leq \mu_{jk}(Q) \leq 1, \quad \sum_{k=1}^P \mu_{jk}(Q) = 1 \quad (1)$$

求目标  $Q$  属于  $C_k$  类的隶属度  $\mu_k(Q)$  ( $k = 1, \dots, P$ ).

以上就是隶属度转换,也称为隶属度合成.

在国内,人们最早从水质评价中指标权重该如何确定的争论中得到启发,逐步开始关注隶属度的转换算法.并且,开始时注意点放在确定怎样的指标“重要性权重”可正确实现隶属度转换.如,模糊综合评判把隶属度转换看作是指标隶属度与指标重要性权重的“加权和”,并且围绕着指标重要性权重该由专家按主观方法确定(称为专家权),还是应该按如“超标法”这种相对客观的方法确定(称为超标权)的争论延续了三十多年,至今未达成共识<sup>[3-7]</sup>.

因为水质评价中的“权重”之争没有定论,又没有可相信的“隶属度转换”算法,所以,文献[8]把模糊模式识别方法用于水质评价:在“最优权”意义上,把与待识样本有最大“模糊贴适度”的那个标准化样本(由质量标准提供)代表的类,作为待识样本的类别,由此避免模糊综合评判中需应用指标重要性权重实现的“隶属度转换”.但是,定义“模糊贴适度”的前提条件是实施无量纲化,结果是必然造成分类信息失真;而基于“隶属度转换”的水质评价方法的优点就是不造成分类信息失真.所以,在水质评价中,试图以“模糊模式识别”替代“模糊综合评判”是不行的,但是,后者必须解决

收稿日期 2007-10-23 收修稿日期 2007-12-27  
Received October 23, 2007; in revised form December 27, 2007  
国家自然科学基金(60474019),河北省自然科学基金(F2005000482)资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (60474019) and Natural Science Foundation of Hebei Province (F2005000482)

1. 河北工程大学不确定性数学研究所 邯郸 056038  
1. Institute of Uncertainty Mathematics, Hebei University of Engineering, Handan 056038  
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.00315

表 1 项目风险评价的评价矩阵  
Table 1 The evaluation matrix of the risk evaluation of project

| 总目标                      | 综合评判因素集                      |                 |               | 专家评判意见 |      |      |      |      |   |
|--------------------------|------------------------------|-----------------|---------------|--------|------|------|------|------|---|
|                          | 一级因素                         | 二级因素            | 三级因素          | 轻微     | 较小   | 一般   | 较高   | 严重   |   |
| 技术风险 (0.38)              | 上部结构 (0.50)                  | 钢桁梁制安 (0.20)    | 0             | 4/10   | 4/10 | 1/10 | 1/10 | 0    |   |
|                          |                              | 吊杆制造安装 (0.10)   | 4/10          | 6/10   | 0    | 0    | 0    | 0    |   |
|                          |                              | 系杆制造安装 (0.15)   | 1/10          | 7/10   | 2/10 | 0    | 0    | 0    |   |
|                          |                              | 钢箱拱安装 (0.25)    | 0             | 7/10   | 2/10 | 1/10 | 0    | 0    |   |
|                          |                              | 支座安装 (0.05)     | 3/10          | 5/10   | 1/10 | 1/10 | 0    | 0    |   |
|                          |                              |                 | Y 构悬臂梁 (0.25) | 0      | 3/10 | 3/10 | 3/10 | 1/10 |   |
|                          | 工程<br>项目<br>风险               | 下部结构 (0.10)     | 墩柱 (0.20)     | 0      | 4/10 | 5/10 | 1/10 | 0    | 0 |
|                          |                              |                 | 横梁 (0.15)     | 0      | 8/10 | 1/10 | 1/10 | 0    | 0 |
|                          |                              |                 | 柱基础 (0.65)    | 0      | 0    | 8/10 | 2/10 | 0    | 0 |
|                          | 经济风险 (0.40)                  | 大型临时施工设备 (0.40) |               | 0      | 5/10 | 4/10 | 1/10 | 0    | 0 |
| 融资通道不畅 (0.15)            |                              | 0               | 5/10          | 3/10   | 2/10 | 0    | 0    |      |   |
| 物料超常涨价 (0.25)            |                              | 0               | 4/10          | 5/10   | 1/10 | 0    | 0    |      |   |
| 关键项目的实际支出与预算差距很大 (0.60)  |                              | 0               | 3/10          | 3/10   | 3/10 | 1/10 | 0    |      |   |
| 不利气象条件: 高温、高热、暴雨等 (0.35) |                              | 0               | 8/10          | 2/10   | 0    | 0    | 0    |      |   |
| 自然风险 (0.10)              | 不利水文条件: 洪水、泥石流等 (0.25)       |                 | 1/10          | 7/10   | 1/10 | 1/10 | 0    | 0    |   |
|                          | 不利地质条件: 地震、滑坡、地质情况复杂等 (0.40) |                 | 0             | 6/10   | 3/10 | 0    | 1/10 | 0    |   |
| 法律风险 (0.12)              | 分包商行为 (0.60)                 |                 | 0             | 6/10   | 3/10 | 1/10 | 0    | 0    |   |
|                          | 合同失效诉讼 (0.40)                |                 | 2/10          | 6/10   | 1/10 | 1/10 | 0    | 0    |   |

隶属度转换算法问题。

为了改变“加权和”这种简单化做法,文献[9]将模糊方法与粗集理论相结合,给出了计算隶属度转换的一种“主客观综合法”。但是,模糊综合评判中的“加权和”至今仍被广泛应用<sup>[10-11]</sup>。

人们已意识到模糊综合评价中的“加权和”有些简单,但是,总相信存在一种“指标权”能正确实现隶属度转换,所以,寻求一种“权重”使之能正确实现隶属度转换的努力从未停止。如文献[1]在改进的模糊综合评判中,定义“综合权重”替代指标重要性权重实现由指标隶属度到目标隶属度的转换,并且,这种隶属度转换方法已被广泛应用于工业过程中。

上述所有做法都有一个共同思路,即认为存在一种能正确实现隶属度转换的“指标权”,并且都在设法寻找这种指标权。这种思路的缺欠在于:因为没有从对目标 $Q$ “分类”的角度去考虑隶属度转换,所以无法揭示对于目标 $Q$ 分类而言,指标隶属度中哪部分是有用的,哪部分是没用的,从而导致了指标隶属度中原本对目标 $Q$ 分类不起作用的冗余数值也被用于计算目标隶属度。

我们认为,不应完全寄希望于寻找某种“指标权”就能正确实现隶属度转换,而应从对目标 $Q$ 分类的角度去考虑推导隶属度转换的数学计算方法。针对隶属度转换中的冗余数据问题,我们设计了一种滤波器,在隶属度转换过程中,可以识别对目标 $Q$ 分类不起作用的冗余的指标隶属度和指标隶属度中的冗余数值,并从指标隶属度中提取出对目标分类起作用的“有效值”,用于计算目标隶属度,进而建立实现隶属度转换的一般方法。

### 1 区分权与指标隶属度的有效值

我们的目的是对目标 $Q$ 分类,所以,从对目标 $Q$ 分类的角度出发,最需关心的问题是:是否每一项指标隶属度对目

标 $Q$ 分类都是有用的?其中有没有对目标 $Q$ 分类来说是不起作用的冗余的指标隶属度?每一项指标隶属度中是否存在对目标 $Q$ 分类来说是不起作用的冗余数值?这些问题都是非常重要的,因为这涉及到究竟怎样的指标隶属度和隶属度中怎样的数值才有资格参与计算目标隶属度。为了弄清楚这些问题,进行如下分析。

1) 如果  $\mu_{j1}(Q) = \mu_{j2}(Q) = \dots = \mu_{jP}(Q)$ , 这时,  $j$  指标隶属度提供了这样的分类信息:单从  $j$  指标看,目标  $Q$  属于各类的程度都一样。显然,这种信息对于确定目标  $Q$  究竟该属于哪一类不起作用,删除  $j$  指标也不会影响  $Q$  的分类,所以,此时的  $j$  指标隶属度对于目标  $Q$  分类而言,是不起作用的冗余的指标隶属度。如果用实数  $\alpha_j(Q)$  表示  $j$  指标对目标  $Q$  分类所做贡献大小的归一化量化值,则此种情况下有  $\alpha_j(Q) = 0$ 。

2) 如果存在整数  $k$  使  $\mu_{jk}(Q) = 1$ , 其余隶属度均为 0, 这时  $j$  指标隶属度提供的分类信息是:单从  $j$  指标看,目标  $Q$  只能属于  $C_k$  类而不可能属于其他类。这时,  $j$  指标对于  $Q$  的分类做出了最大的贡献,实数  $\alpha_j(Q)$  此时应取到最大值。

3) 同理可说明,当隶属度  $\mu_{jk}(Q)$  对  $k$  而言取值越集中时,  $j$  指标隶属度对目标  $Q$  分类做出的贡献越大,即  $\alpha_j(Q)$  越大;反之,当  $\mu_{jk}(Q)$  对  $k$  而言取值越分散时,  $j$  指标隶属度对目标  $Q$  分类做出的贡献越小,即  $\alpha_j(Q)$  越小。

上述分析说明,表示  $j$  指标对目标  $Q$  分类贡献大小的实数  $\alpha_j(Q)$ , 其值由隶属度  $\mu_{jk}(Q)$  对  $k$  而言取值集中与分散的程度决定;而  $\mu_{jk}(Q)$  对  $k$  而言取值集中与分散的程度可由隶属度的熵  $H_j(Q)$  定量描述,所以,实数  $\alpha_j(Q)$  可表示为熵  $H_j(Q)$  的函数<sup>[12]</sup>。

$$H_j(Q) = - \sum_{k=1}^P \mu_{jk}(Q) \cdot \ln \mu_{jk}(Q) \quad (2)$$

$$v_j(Q) = 1 - \frac{1}{\ln P} H_j(Q) \quad (3)$$

$$\alpha_j(Q) = \frac{v_j(Q)}{\sum_{t=1}^m v_t(Q)} \quad (4)$$

**定义 1.** 若目标  $Q$  的  $j$  指标属于  $C_k$  类的隶属度为  $\mu_{jk}(Q)$ ,  $k = 1, \dots, P$ ,  $j = 1, \dots, m$ , 且  $\mu_{jk}(Q)$  满足式 (1), 则称由式 (2)~(4) 确定的实数  $\alpha_j(Q)$  为  $j$  指标关于目标  $Q$  的区分权. 显然, 区分权  $\alpha_j(Q)$  满足

$$0 \leq \alpha_j(Q) \leq 1, \quad \sum_{j=1}^m \alpha_j(Q) = 1 \quad (5)$$

区分权  $\alpha_j(Q)$  的意义在于“区分”, 即它是指标隶属度能否把目标  $Q$  所属类别区分开和在怎样程度上区分开的一种度量. 如果区分权  $\alpha_j(Q) = 0$ , 由熵的性质知<sup>[12]</sup>, 此时必有  $\mu_{j1}(Q) = \mu_{j2}(Q) = \dots = \mu_{jP}(Q)$ , 在这种情况下,  $j$  指标的隶属度是对目标  $Q$  分类不起作用的冗余指标隶属度; 而冗余指标隶属度自然不能参与计算目标  $Q$  的隶属度.

**定义 2.** 若  $\mu_{jk}(Q)$ ,  $k = 1, \dots, P$ ,  $j = 1, \dots, m$  是  $j$  指标属于  $C_k$  类的隶属度,  $\alpha_j(Q)$  是  $j$  指标关于目标  $Q$  的区分权, 则称

$$\alpha_j(Q) \cdot \mu_{jk}(Q), \quad k = 1, \dots, P \quad (6)$$

是  $j$  指标的  $k$  类隶属度的有效区分值, 简称  $k$  类有效值.

当区分权  $\alpha_j(Q) = 0$  时, 表明  $j$  指标隶属度对于目标  $Q$  分类来说是不起作用的冗余指标隶属度; 而对目标  $Q$  分类来说冗余指标隶属度不能参与计算目标  $Q$  的隶属度. 注意到当  $\alpha_j(Q) = 0$  时, 有效值  $\alpha_j(Q) \cdot \mu_{jk}(Q) = 0$ , 由此可发现, 用于计算目标  $Q$  的  $k$  类隶属度  $\mu_k(Q)$  的不是  $j$  指标的  $k$  类隶属度  $\mu_{jk}(Q)$ , 而是  $j$  指标的  $k$  类有效值  $\alpha_j(Q) \cdot \mu_{jk}(Q)$ , 这是一个至关重要的事实.

当用指标的有效值代替隶属度参与计算目标隶属度时, 区分权就是一种滤波器, 它能识别对目标分类来说不起作用的冗余的指标隶属度和指标隶属度中的冗余数值.

## 2 指标隶属度的可比值与隶属度转换

虽然  $j$  指标的  $k$  类有效值  $\alpha_j(Q) \cdot \mu_{jk}(Q)$  对于计算目标  $Q$  的  $k$  类隶属度  $\mu_k(Q)$  是必不可少的, 但是, 在通常情况下, 不同  $j$  指标的  $k$  类有效值之间并不具有可比性, 更不具有直接可加性, 因为不同  $j$  指标的  $k$  类有效值的“单位重要性”程度在通常情况下是不同的. 原因是: 在获取指标各类隶属度的过程中, 在通常情况下都没有用到各指标关于目标  $Q$  的“相对重要性”. 所以, 在计算目标  $Q$  的  $k$  类隶属度  $\mu_k(Q)$  时, 不同  $j$  指标的  $k$  类有效值必须转化为可进行大小比较的可比有效值.

**定义 3.** 若  $\alpha_j(Q) \cdot \mu_{jk}(Q)$  是  $j$  指标的  $k$  类有效值,  $\beta_j(Q)$  是  $j$  指标关于目标  $Q$  的重要性权重, 则称

$$\beta_j(Q) \cdot \alpha_j(Q) \cdot \mu_{jk}(Q), \quad k = 1, \dots, P \quad (7)$$

是  $j$  指标  $k$  类隶属度的可比有效值, 简称  $k$  类可比值.

显然, 目标  $Q$  的不同  $j$  指标的  $k$  类可比值之间, 具有可比性和直接可加性.

**定义 4.** 若  $\beta_j(Q) \cdot \alpha_j(Q) \cdot \mu_{jk}(Q)$  是目标  $Q$  的  $j$  指标的  $k$  类可比值, 则称

$$M_k(Q) = \sum_{j=1}^m \beta_j(Q) \cdot \alpha_j(Q) \cdot \mu_{jk}(Q), \quad k = 1, \dots, P \quad (8)$$

是目标  $Q$  的  $k$  类可比和.

显然, 目标  $Q$  的  $k$  类可比和相对越大, 则属于  $C_k$  类的程度越大.

**定义 5.** 若  $M_k(Q)$ ,  $k = 1, \dots, P$  是目标  $Q$  的  $k$  类可比和, 则

$$\mu_k(Q) = \frac{M_k(Q)}{\sum_{t=1}^P M_t(Q)}, \quad k = 1, \dots, P \quad (9)$$

其中,  $\mu_k(Q)$  是目标  $Q$  属于  $C_k$  类的隶属度.

显然, 由式 (9) 定义的隶属度  $\mu_k(Q)$  满足

$$0 \leq \mu_k(Q) \leq 1, \quad \sum_{k=1}^P \mu_k(Q) = 1 \quad (10)$$

至此, 在目标  $Q$  的各项指标的隶属度与指标重要性权重已知的条件下, 通过式 (2)~(4)、(8)、(9) 实现了从指标隶属度到目标隶属度的转换, 并且在转换过程中, 不增加新的先验知识, 也不造成分类信息失真. 转换算法可概括为“一滤、二比、三合成”. 一滤是指用区分权滤波, 滤掉指标隶属度中对目标分类不起作用的冗余数值, 提取有效值; 二比是指有效值转化为可比值并生成可比和; 三合成是指用可比和定义目标隶属度.

特别值得一提的是, “一滤、二比、三合成”算法模式是在指标隶属度中不包含指标关于目标的“相对重要性”条件下得到的. 倘若不然, 对于某个特定决策问题, 如果在指标隶属度中包含着指标关于目标的“相对重要性”, 那么, 在这种情况下,  $j$  指标的  $k$  类有效值  $\alpha_j(Q) \cdot \mu_{jk}(Q)$  同时也是  $k$  类可比值. 此时式 (8) 的可比和可以用有效和替代, 即

$$M_k(Q) = \sum_{j=1}^m \alpha_j(Q) \cdot \mu_{jk}(Q), \quad k = 1, \dots, P \quad (11)$$

注意到有效和  $M_k(Q)$  显然满足

$$0 \leq M_k(Q) \leq 1, \quad \sum_{k=1}^P M_k(Q) = 1 \quad (12)$$

由式 (12) 知, 有效和  $M_k(Q)$  就是目标  $Q$  属于  $C_k$  类的隶属度  $\mu_k(Q)$ , 所以, 有下述定义.

**定义 6.** 若  $\mu_{jk}(Q)$ ,  $j = 1, \dots, m$ ,  $k = 1, \dots, P$  是目标  $Q$  的  $j$  指标属于  $C_k$  类的隶属度, 如果  $\mu_{jk}(Q)$  中包含着  $j$  指标关于目标  $Q$  的“相对重要性”, 并且  $\mu_{jk}(Q)$  满足式 (1),  $\alpha_j(Q)$  是  $j$  指标关于目标  $Q$  的区分权, 则

$$\mu_k(Q) = \sum_{j=1}^m \alpha_j(Q) \cdot \mu_{jk}(Q) \quad (13)$$

其中,  $\mu_k(Q)$  是目标  $Q$  属于  $C_k$  类的隶属度.

上述隶属度转换算法可概括为“一滤、二合成”, 是“一滤、二比、三合成”的简化模式.

环评中, 由指标监测值隶属度到样本隶属度的转换用“一滤、二合成”模式. 原因是: 环评中质量“标准”的分类数据中隐含着污染指标对环境质量危害的“相对重要性”, 所以, 根据“标准”中分类数据通过构造隶属函数获得的指标监测值隶属度中, 隐含着指标 (对环境质量危害) 的“相对重要性”.

顺便补充一点:在水质评价中,因“标准”的分类数据中隐含着污染指标对水质危害的“相对重要性”(理由略),所以,指标的“相对重要性”不能再由专家另行规定;又因“标准”中分类数据的非线性关系,使得人们不可能把隐含在分类数据中的指标对水质危害的“相对重要性”,再改用“权重”这种表达指标“相对重要性”的惯用形式来表达.所以,在水质评价中,人们争论了三十多年用来表示指标(对水质危害的)重要性“权重”的“专家权”与“超标权”都是没有意义的.

### 3 实例

文献[1]给出某工程项目风险评价矩阵如表1所示,表中括号内数字为相应指标的重要性权值.

以表1中项目风险评价矩阵为例,计算工程项目风险隶属度步骤如下:

1) 按“一滤、二比、三合成”模式计算上部结构  $x_1$  的隶属度.

a)  $x_1$  下辖的底层指标的隶属度矩阵为

$$U(x_1) = \begin{pmatrix} 0 & 0.4 & 0.4 & 0.1 & 0.1 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.7 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \end{pmatrix} \quad (14)$$

b) 计算矩阵  $U(x_1)$  中各行指标的区分权,得区分权向量  $\alpha(x_1)$  为

$$\alpha(x_1) = (0.1123, 0.2528, 0.2180, 0.2180, 0.1191, 0.0789)$$

c) 由表1知,各底层指标关于上部结构  $x_1$  的重要性权重向量为

$$\beta(x_1) = (0.20, 0.10, 0.15, 0.25, 0.05, 0.25)$$

d) 由式(7)计算6种指标关于5个等级隶属度的可比值,可比值矩阵为

$$N(x_1) = \begin{pmatrix} 0 & 0.0090 & 0.0090 & 0.0022 & 0.0022 \\ 0.0101 & 0.0152 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0033 & 0.0229 & 0.0065 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0382 & 0.0109 & 0.0055 & 0 \\ 0.0018 & 0.0030 & 0.0006 & 0.0006 & 0 \\ 0 & 0.0060 & 0.0060 & 0.0060 & 0.0020 \end{pmatrix} \quad (15)$$

e) 由式(8)计算上部结构  $x_1$  的各类可比和,得可比和向量  $M(x_1)$  为

$$M(x_1) = (0.0134, 0.1293, 0.0433, 0.0191, 0.0042)$$

f) 由式(9)计算上部结构  $x_1$  的隶属度向量  $\mu(x_1)$  为

$$\mu(x_1) = (0.0639, 0.6176, 0.2068, 0.0914, 0.0203)$$

同理,得下部结构  $x_2$  的隶属度向量  $\mu(x_2)$  为

$$\mu(x_2) = (0, 0.1698, 0.6581, 0.1721, 0)$$

由表1知,大型临时施工设备  $x_3$  的隶属度向量  $\mu(x_3)$  为

$$\mu(x_3) = (0, 0.5, 0.4, 0.1, 0)$$

2) 同样,由  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  的隶属度计算技术风险  $y_1$  的隶属度向量  $\mu(y_1)$  为

$$\mu(y_1) = (0.0268, 0.5016, 0.3562, 0.1068, 0.0085)$$

同理可得经济风险  $y_2$ 、自然风险  $y_3$ 、法律风险  $y_4$  的隶属度向量分别为

$$\mu(y_2) = (0, 0.3790, 0.3773, 0.2025, 0.0412)$$

$$\mu(y_3) = (0.0199, 0.7123, 0.2140, 0.0199, 0.0339)$$

$$\mu(y_4) = (0.0656, 0.6000, 0.2344, 0.1000, 0)$$

3) 由技术风险  $y_1$ 、经济风险  $y_2$ 、自然风险  $y_3$  和法律风险  $y_4$  的隶属度,按照与步骤1)相同的步骤,可得工程项目风险  $Z$  的隶属度向量  $\mu(Z)$  为

$$\mu(Z) = (0.0220, 0.5059, 0.3258, 0.1244, 0.0220) \quad (16)$$

4) 风险识别

因项目风险等级划分有序( $C_k$ 级优于 $C_{k+1}$ 级),所以,适用于无序划分的最大隶属度识别准则在此并不适用,改用置信度识别准则<sup>[3]</sup>,根据向量  $\mu(Z)$ ,判工程项目风险属于  $C_3$  级,且有不低于85% ( $0.0220 + 0.5059 + 0.3258 = 0.8537$ ) 的置信度.

### 4 小结

1) “一滤、二比、三合成”是一般的隶属度转换算法模式,其中关键步骤是区分权滤波;2) “一滤、二比、三合成”模式不增加先验知识,也不造成分类信息失真;3) 本文算法的理论价值是:用算法说明模糊逻辑系统<sup>[14]</sup>中由论域  $U$  上模糊集到论域  $V$  上模糊集的转换算法与信息条件有关,并在不同信息条件下给出了两种不同的算法实现.

### References

- Guo Jie, Hu Mei-Xin. The improvement on project risk fuzzy evaluation. *Industrial Engineering Journal*, 2007, **10**(3): 86-90  
(郭捷, 胡美新. 改进的项目风险模糊评价研究. *工业工程*, 2007, **10**(3): 86-90)
- Saaty T L. *The Analytic Hierarchy Process*. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 1988
- Zeng Ming-Rong, Wang Cheng-Hai. Application of fuzzy maths in water quality evaluation. *Fujian Environment*, 1999, **16**(5): 7-9  
(曾明荣, 王成海. 模糊数学在水质评价中的应用. *福建环境*, 1999, **16**(5): 7-9)
- Mei Xue-Bin, Wang Fu-Gang, Cao Jian-Feng. The application of fuzzy comprehensive evaluation on water quality and discussion. *Global Geology*, 2000, **19**(2): 172-177  
(梅学彬, 王福刚, 曹建锋. 模糊综合评价法在水质评价中的应用及探讨. *世界地质*, 2000, **19**(2): 172-177)
- Lu Yong-Sen. *Environment Evaluation*. Shanghai: Tongji University, 2002. 118-120  
(陆雍森. *环境评价*. 上海: 同济大学出版社, 2002. 118-120)
- Huang Yu-Kun, Cui Xin-Yuan, Jia Sa-Sa. Research on fuzzy overall evaluation for project risks. *Journal of Zhejiang Vocational and Technical Institute of Transportation*, 2005, **6**(4):

1-5

(黄玉坤, 崔新媛, 贾飒飒. 工程项目风险的模糊综合评价研究. 浙江交通职业技术学院学报, 2005, **6**(4): 1-5)

- 7 Li Hai-Ling, Liu Ke-Jian, Li Qian. Research on the application of fuzzy comprehensive evaluation in risk evaluation for an engineering project. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2005, **24**(6): 78-81  
(李海凌, 刘克剑, 李芊. 模糊综合评价在工程项目风险评价中的应用研究. 西华大学学报自然科学版, 2005, **24**(6): 78-81)
- 8 Tian Jing-Huan, Qiu Lin, Chai Fu-Xin. Application of fuzzy recognition in comprehensive evaluation of water quality. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(7): 950-953  
(田景环, 邱林, 柴福鑫. 模糊识别在水质综合评价中的应用. 环境科学学报, 2005, **25**(7): 950-953)
- 9 Huang Guang-Long, Yu Zhong-Hua, Wu Zhao-Tong. A method of comprehensive evaluation with subjective and objective information based on evidential reasoning and rough set theory. *China Mechanical Engineering*, 2001, **12**(8): 930-934  
(黄广龙, 余忠华, 吴昭同. 基于证据推理与粗集算理论的主客观综合评价方法. 中国机械工程, 2001, **12**(8): 930-934)
- 10 Wang You-Qiang, Chen Shun-Qing, Huang Bing-Xi, Song Kai-Li, Song Ling. Fuzzy comprehensive evaluation for colliery machine component parts reliability. *Coal Mine Machinery*, 2004, **19**(2): 53-55  
(王优强, 陈舜青, 黄丙习, 宋开利, 宋玲. 煤矿机械零件的可靠性评价研究. 煤矿机械, 2004, **19**(2): 53-55)
- 11 Lv Ying-Zhao, He Shuan-Hai. Fuzzy reliability evaluation of defective RC beam bridge. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2005, **5**(4): 58-62  
(吕颖钊, 贺栓海. 缺损钢筋混凝土梁桥模糊可靠性评价模型. 交通运输工程学报, 2005, **5**(4): 58-62)
- 12 RrnomA M [Author], Wu Mao-Sen [Translator]. *Probability and Information*. Shanghai: Science and Technology Press of Shanghai, 1964. 29-45  
(雅格洛姆 [著], 吴茂森 [译]. 概率与信息. 上海: 上海科学技术出版社, 1964. 29-45)
- 13 Cheng Qian-Sheng. Attribute recognition theoretical model with application. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1997, **33**(1): 12-20  
(程乾生. 属性识别理论模型及其应用. 北京大学学报 (自然科学版), 1997, **33**(1): 12-20)
- 14 Zhou Dong-Hua, Ye Yin-Zhong. *Modern Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control*. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 168-172  
(周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制. 北京: 清华大学出版社, 2000. 168-172)

刘开第 河北工程大学教授. 主要研究方向为不确定性信息处理. 本文通信作者. E-mail: liukaidi@hebeu.edu.cn

(LIU Kai-Di Professor at Hebei University of Engineering. His main research interest is processing method of unascertained information. Corresponding author of this paper.)

庞彦军 河北工程大学教授. 主要研究方向为不确定性信息处理.

E-mail: pangyanj@tom.com

(PANG Yan-Jun Professor at Hebei University of Engineering. His main research interest is processing method of unascertained information.)

栗文国 河北工程大学硕士研究生. 主要研究方向为不确定性信息处理.

E-mail: archangel1900@sina.com

(LI Wen-Guo Master student at Hebei University of Engineering. His main research interest is processing method of unascertained information.)