

## 一种多类型证据的合成评估方法

王亮<sup>1</sup>, 吕卫民<sup>1</sup>, 金永川<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院七系, 山东烟台 264001; 2. 中国人民解放军91681部队, 浙江宁波 315731)

**摘要:** 为了充分利用实际工程中众多状态信息, 提出一种多类型证据的合成方法, 用以评估复杂系统健康状态. 首先分析基于多类型证据的合成评估流程, 给出不同类型证据的标准化方法, 并计算信息熵赋予各证据不同的熵权; 然后提出区间灰数型证据的基本可信度分配方法及其他不同类型证据在同一识别框架下的基本可信度转化方法; 最后将所有证据在同一识别框架下进行合成评估. 算例分析结果验证了所提出方法的可行性和有效性.

**关键词:** 证据理论; 多类型证据; 区间灰数; 熵权

**中图分类号:** TP301

**文献标志码:** A

## A combination assessment method based on multi-types of evidence

WANG Liang<sup>1</sup>, LV Wei-min<sup>1</sup>, JIN Yong-chuan<sup>2</sup>

(1. The 7th Department, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China; 2. Unit 91681 of PLA, Ningbo 315731, China. Correspondent: WANG Liang, E-mail: navywl@163.com)

**Abstract:** To take full advantages of much health information in the practical engineering, a combination method is presented, which is used to assess health condition of complex system. The process of combination assessment based on multi-types of evidences is analyzed firstly. Standardized methods of different types of uncertainty indexes are proposed, and different weights are given to different indexes by means of calculating information entropy. Then, the basic belief transformation method of interval gray number indexes is proposed. Finally, all types of evidences are synthesized in the same recognition framework. The application analysis shows the feasibility and effectiveness of the proposed model.

**Key words:** evidence theory; multi-types of evidence; interval grey number; entropy weight

### 0 引言

证据理论<sup>[1]</sup>是由Dempster在研究统计问题时首先提出, 并由Shafer进一步完善和发展起来的一种处理不确定性信息的工具, 能够很好地处理具有模糊和不确定信息的合成问题, 已在决策、人工智能、专家系统、信息融合等领域得到不同程度的应用<sup>[2-4]</sup>.

在工程实践中, 多类型证据合成评估通常既包含定性证据又包含定量证据, 因此多类型证据合成评估可以归结为混合型多属性决策问题. 目前, 对于此类问题, 部分专家学者进行了一定程度的研究. 文献[5]在证据推理方法中用熵权法得到各属性的客观权重, 以此客观权重代替证据推理中的主观权重; 文献[6]同样提出了一种基于不确定信息熵的权值计算方法, 该方法首先将各种不确定信息转换到统一的信度框架下, 计算出不确定信息熵, 从而获得属性客观权重

值, 但是两者在计算熵权时未考虑各属性的标准化, 忽略了某些属性值虽然不同但对于决策所发挥的作用可能相同的问题; 文献[7-9]分别在不完全信息条件下, 提出多属性决策问题的证据推理算法的改进和完善, 使得该方法能够合理地处理属性为模糊、未知等不同情形的多属性决策问题, 但对于实际工程中普遍存在的区间灰数的处理未进行深入研究; 文献[10]研究了多属性群决策中决策者权重的调整问题, 通过计算专家个体决策结果与群体决策结果的偏差量并结合熵理论求得专家的客观权重, 将其作为权重调整值进行决策者的权重调整; 文献[11]在针对方案的属性值为区间灰数与确定语言等级, 或在两个连续的语言等级之间权重完全已知的混合型灰色多属性群决策问题, 提出一种新的决策方法. 上述几种方法仅适用于群决策, 特别是在权重确定过程中需要多位决策者的主观信息, 因此适用性不够广泛.

收稿日期: 2013-07-04; 修回日期: 2013-09-11.

基金项目: 总装预研基金项目(9140A27020210JB1404, 9140A19030811JB1401).

作者简介: 王亮(1985-), 男, 博士生, 从事装备可靠性、故障预测的研究; 吕卫民(1970-), 男, 教授, 从事装备综合保障等研究.

从目前已有的文献看,鲜有针对复杂系统健康状态评估中常出现的3类指标证据——不确定自然语言指标、确定型定量指标以及区间灰数型定量指标的共同合成评估研究,而且现有的研究中权重的确定也存在各种问题.基于此,本文提出一种多类型指标证据合成方法,同时通过各类型证据的标准化改进熵权的确定,将这3种类型的证据进行共同合成研究.

## 1 多类型证据合成评估流程

对于一个评估问题,其所有可能的评估结果的集合用  $\Theta$  表示,称作识别框架,记  $2^\Theta$  为  $\Theta$  的幂集.

如果集函数  $\text{mass}: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  满足:

- 1)  $m(\phi) = 0$ ;
- 2)  $\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1$ .

则称  $m$  为识别框架  $\Theta$  上的基本可信度分配函数.  $\forall A \subseteq \Theta$ , 称  $m(A)$  为  $A$  的基本可信度,  $m(A)$  反映了证据支持命题  $A$  的程度.  $m(\Theta)$  表示无法确定分配在哪一命题的基本可信度.

Dempster 合成法则是证据理论的核心,之所以 D-S 证据理论具有较强的多源信息融合能力,正是由于 Dempster 合成法则,它是一个反映证据的联合作用法则. 设  $\text{Bel}_1$  和  $\text{Bel}_2$  是同一识别框架  $\Theta$  上的2个信度函数,  $m_1$  和  $m_2$  分别是其对应的基本可信度分配函数,则这两批证据可以合成.

$$m(A) = \begin{cases} 0, & A = \phi; \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i)m_2(B_j)}{1 - K}, & A \neq \phi. \end{cases} \quad (1)$$

其中  $K = \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i)m_2(B_j) < 1$ .

上式也可记为  $m(A) = m_1 \oplus m_2$ . 对于多个证据的合成  $M = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n$ , 可以从两个证据合成的情况推广得到.

为减少可能存在的冲突证据的影响,利用熵权法对各个证据分配不同权重以修正基本可信度. 这种方法属于通过修正证据源解决冲突证据的合成问题<sup>[12]</sup>, 其优点在于很好地保留了 Dempster 合成规则满足结合律、交换律等优良的数学性质.

设某一问题的证据集为  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ , 证据  $F_i$  的权重为  $\omega_i$ . 这个权重反映了证据  $F_i$  在证据合成中的重要程度,所有证据的权重系数满足  $\omega_i \in [0, 1], \sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ .

利用熵权法修正 D-S 证据理论步骤如下.

Step 1: 对所研究问题识别框架内的各命题分配基本可信度值,并构建证据的熵权;

Step 2: 利用熵权调整识别框架内所有命题的基

本可信度值,修正后的基本可信度分配函数为

$$\begin{cases} m'_i(A) = \omega_i m_i(A), \\ m'(\Theta) = 1 - \sum_{i=1}^N m'_i(A); \end{cases} \quad (2)$$

Step 3: 利用合成式 (1) 对各个证据修正后的基本可信度进行合成,得到最终结果.

本文研究复杂系统状态评估过程中的多类型证据合成评估方法,具体流程如下.

Step 1: 针对具体系统建立健康状态评估指标体系;

Step 2: 通过专家咨询,直接给出定性指标在健康状态识别框架下的基本可信度;

Step 3: 对各类型证据进行标准化处理,利用熵权法确定各指标的权重;

Step 4: 对各类型证据进行同一识别框架下的基本可信度转换;

Step 5: 利用得到的熵权修正各证据的基本可信度;

Step 6: 通过 D-S 证据理论对各类型证据合成进行评估,得到复杂系统健康状态.

## 2 各类型评估指标熵权的确定

### 2.1 熵权的概念

熵的概念源自于热力学,自从香农将其引入信息论,熵在工程技术、管理科学、社会经济等领域取得了广泛应用.熵是对系统不确定性程度的一种度量,所谓熵权就是根据各指标传递给决策者信息量的大小决定相应指标的权重,能够有效地度量在状态评估过程中所获取数据提供的有用信息量.

若某一系统有  $m$  种不同状态,每种状态出现的概率为  $p_i (i = 1, 2, \dots, m)$ , 则该系统的熵可表示为

$$H = -k \sum_{i=1}^m p_i \ln p_i. \quad (3)$$

假设被评估的同类设备集为  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$ , 评估指标集为  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_q\}$ ; 设备集  $E$  和指标集  $I$  构成评估矩阵  $A = [a_{ij}]_{p \times q}$ ,  $a_{ij}$  表示第  $i$  个被评估设备的第  $j$  个指标值,指标值  $a_{ij}$  包含复杂系统健康状态评估问题的定性指标、定量指标以及区间灰数等不确定指标,在确定各指标的熵权之前,必须对这些指标进行标准化处理. 设  $B = [b_{ij}]_{p \times q}$  为  $A$  标准化处理之后的标准评估矩阵.

第  $j$  个评估指标的熵定义为

$$H_j = -k \sum_{i=1}^p f_{ij} \ln f_{ij}. \quad (4)$$

其中:  $f_{ij} = b_{ij} / \sum_{i=1}^p b_{ij}$ ;  $k = 1 / \ln p$ ;  $H_j \geq 0, k \geq 0$ .

第  $j$  个评估指标的熵权为

$$w_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^q (1 - H_j)} \quad (5)$$

熵权法的思想是依据指标变异性大小来确定客观权重。考虑到工程实际中可能存在某些指标超过一定限度后所反映出的健康状态实际是相同的情况，即使此类指标在界限之外有很大变化，也不能赋予其较大熵权，另外区间灰数型定量指标也无法直接计算信息熵。因此，本文在计算熵权之前将各类指标进行标准化处理，部分处理结果将在下一节被应用。

### 2.2 不确定自然语言指标标准化处理

在进行复杂系统健康状态评估时，某些指标无法定量表示，只能以自然语言的形式给出。假设  $a_{ij}$  为第  $i$  个被评估对象的第  $j$  个不确定自然语言指标，某设备健康状态完备的评估等级集为  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$ 。通过专家咨询某定性指标评估结果可以表示为

$$S(a_{ij}) = \{(C_n, \beta_{n,ij}), n = 1, 2, \dots, N\};$$

$$\beta_{n,ij} \geq 0, \sum_{n=1}^N \beta_{n,ij} \leq 1;$$

$$\beta_{C,ij} = 1 - \sum_{n=1}^N \beta_{n,ij} \geq 0. \quad (6)$$

$\beta_{n,ij}$  表示指标  $a_{ij}$  被评估为健康状态等级  $C_n$  的信度， $\beta_{C,ij}$  表示未分配给任一健康状态等级的信度。

要计算熵权必须将定性指标定量规范化<sup>[5]</sup>，定义  $g_{n,ij}$  为指标  $a_{ij}$  被评为健康状态等级  $C_n$  的效用函数； $G(n, a_{ij})$  为指标  $a_{ij}$  被评为健康等级  $C_n$  的期望效用，则

$$G(n, a_{ij}) = \sum_{n=1}^N \beta_{n,ij} g_{n,ij}. \quad (7)$$

将其作为量化后的规范值。

为了更好地描述复杂系统的健康状态，从健康管理的角度出发，本文将复杂系统健康状态分为 5 个等级： $C = \{\text{良好}(c_1), \text{正常}(c_2), \text{注意}(c_3), \text{恶化}(c_4), \text{病态}(c_5)\}$ 。定性指标的定量转化如表 1 所示。

表 1 定性指标的定量转化

健康等级 $C_n$	良好	正常	注意	恶化	病态
信度 $\beta_{n,ij}$	-	-	-	-	-
效用函数 $g_{n,ij}$	1	0.75	0.5	0.25	0.001
期望效用	$G(n, a_{ij}) = \sum_{n=1}^N \beta_{n,ij} g_{n,ij}$				

### 2.3 确定型定量指标标准化处理

假设  $a_{ij}$  为第  $i$  个被评估设备的第  $j$  个确定型定量指标值，若  $I_j$  为效益型指标，则其标准化处理方法为

$$b_{ij} = \begin{cases} 0, & a_{ij} \leq I_{j,ll}; \\ \frac{a_{ij} - I_{j,ll}}{I_{j,ul} - I_{j,ll}}, & I_{j,ll} \leq a_{ij} \leq I_{j,ul}; \\ 1, & a_{ij} \geq I_{j,ul}. \end{cases} \quad (8)$$

其中： $I_{j,ul}(j = 1, 2, \dots, q)$  表示第  $j$  个评估指标的上限值， $I_{j,ll}$  表示其下限值。

若  $I_j$  为成本型指标，则其标准化处理方法为

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & a_{ij} \leq I_{j,ll}; \\ \frac{I_{j,ul} - a_{ij}}{I_{j,ul} - I_{j,ll}}, & I_{j,ll} \leq a_{ij} \leq I_{j,ul}; \\ 0, & a_{ij} \geq I_{j,ul}. \end{cases} \quad (9)$$

若  $I_j$  为中间型指标，即  $I_j$  具有标准值  $I_{j,s}$  和误差限  $I_{j,el}$ ，并不失一般性地假设具有上下相同的误差限，则其标准化处理方法为

$$b_{ij} = \begin{cases} 0, & a_{ij} \leq I_{j,ll}; \\ \frac{a_{ij} - I_{j,ll}}{I_{j,el}}, & I_{j,ll} \leq a_{ij} \leq I_{j,s}; \\ \frac{I_{j,ul} - a_{ij}}{I_{j,el}}, & I_{j,s} \leq a_{ij} \leq I_{j,ul}; \\ 0, & a_{ij} \geq I_{j,ul}. \end{cases} \quad (10)$$

其中： $I_{j,ul} = I_{j,s} + I_{j,el}$ ， $I_{j,ll} = I_{j,s} - I_{j,el}$ 。

### 2.4 区间灰数型定量指标标准化处理

与研究“随机不确定性”的概率统计和研究“认知不确定性”的模糊数学不同，灰色系统理论<sup>[13]</sup>的研究对象是“部分信息已知，部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统。

本文认为若无法确定某一定量指标的具体值，则其值可用区间灰数<sup>[14-15]</sup>表示，而且复杂系统健康状态评估是为维修决策奠定基础，在评估过程中势必会掺杂有决策者不同程度的偏好，这种偏好可以利用区间灰数的白化权函数<sup>[16]</sup>表达。对于区间灰数指标，为确定其熵权，同样需进行标准化处理。

假设  $\otimes(a_{ij})$  为第  $i$  个被评估设备的第  $j$  个区间灰数定量指标值， $\otimes(a_{ij}) \in (a_{ij}^L, a_{ij}^U)$ ， $a_{ij}^L$  为  $\otimes(a_{ij})$  的下界， $a_{ij}^U$  为其上界。设  $f(\otimes(a_{ij}))$  为区间灰数的白化权函数<sup>[17]</sup>，不失一般性，这里以正区间灰数、三角形白化权函数为例进行研究说明，且  $a_{ij}^U \geq a_{ij}^M \geq a_{ij}^L \geq 0$ 。

为确定其熵权，在充分考虑已知信息的条件下，区间灰数的“核”<sup>[17]</sup>是最可能代表区间灰数“白化值”的实数。

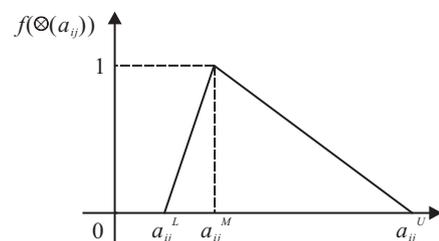


图 1 三角白化权函数

以图 1 所示的三角形白化权函数为例, 区间灰数的核为

$$\tilde{\otimes}(a_{ij}) = \frac{a_{ij}^L + a_{ij}^M + a_{ij}^U}{3}. \quad (11)$$

将所有区间灰数定量指标转化为“核”形式之后, 再对“核”按确定定量指标处理.

### 3 同一识别框架下各类型证据的信度转换

证据理论用于评估的最大优点在于它可以很好地融合包括定量、定性在内的各种类型的指标, 基本原则是将不同类型指标转化为在同一识别框架下的基本可信度.

#### 3.1 不确定自然语言指标处理

本文假设不确定自然语言指标直接以信度结构的形式给出.

#### 3.2 确定型定量指标处理

健康状态等级的划分可看作模糊集, 因此, 确定型指标的信度结构转换可以利用模糊集的隶属度函数实现.

经过前文确定型指标的标准化处理, 值越大则代表健康程度越高. 本文根据相关专家建议采取如图 2 所示的隶属度函数  $l(a_{ij})$ . 需要说明的是, 此隶属度函数已经过标准化处理.

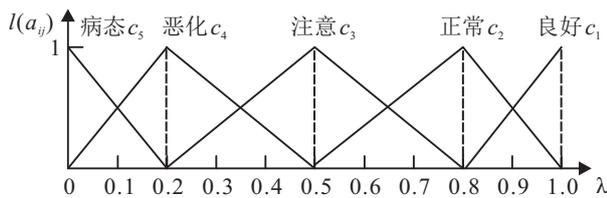


图 2 健康等级模糊隶属度函数

#### 3.3 区间灰数型定量指标处理

对于区间灰数型定量指标, 本文提出一种信度结构转换方法. 该方法将区间灰数指标值的白化权函数与评估框架模糊集的隶属度函数结合, 在充分利用其

不确定性的同时又合理地将其白化. 假设某区间灰数型定量指标  $a_{ij}$  为效益型指标, 其白化权函数及该指标的健康等级模糊隶属度函数如图 3 所示.

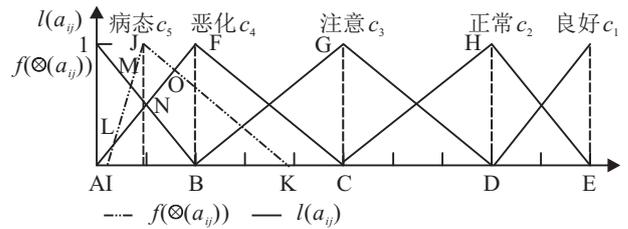


图 3 区间灰数白化权函数与模糊隶属度函数

由图 3 可知, 区间灰数型指标  $a_{ij}$  的白化权函数与健康等级模糊隶属度函数相交, 鉴于区间灰数自身取值的不确定性,  $a_{ij}$  与某一健康等级模糊隶属度函数所围成图形的面积越大, 说明  $a_{ij}$  处于此健康等级的可信度越高. 因此, 图 3 各健康等级的可信度可以表示如下:

$$\beta_{5,ij} = \frac{S_{\Delta MIB}}{S_{\Delta MIB} + S_{\Delta PBK} + S_{\square JMNO} + S_{\square OLIK}},$$

$$\beta_{4,ij} = \frac{S_{\square OLIK}}{S_{\Delta MIB} + S_{\Delta PBK} + S_{\square JMNO} + S_{\square OLIK}},$$

$$\beta_{3,ij} = \frac{S_{\Delta PBK}}{S_{\Delta MIB} + S_{\Delta PBK} + S_{\square JMNO} + S_{\square OLIK}},$$

$$\beta_{4or5,ij} = \frac{S_{\square JMNO}}{S_{\Delta MIB} + S_{\Delta PBK} + S_{\square JMNO} + S_{\square OLIK}}.$$

其中:  $\beta_{5,ij}$  为指标  $a_{ij}$  被评估为病态等级的可信度, 其他类推;  $S_{\Delta MIB}$  为三角形  $\Delta MIB$  的面积, 其他类推.

### 4 算例分析

某特种车辆是我军的重要装备, 液压系统是其主要的执行装置, 现要求评估 3 辆特种车辆的液压系统健康状态. 为了更好地分析本文提出的方法, 选取涵盖上述 3 种类型信息的 5 项指标作为其评估证据, 分别是自然环境影响 ( $z_1$ )、液压缸压力 ( $z_2$ )、液压油温 ( $z_3$ )、平衡阀压力 ( $z_4$ ) 以及累计执行任务时间 ( $z_5$ ). 3 辆车的评估指标情况如表 2 所示.

表 2 3 辆车的评估指标情况

指标/范围/单位	1 号车	2 号车	3 号车
$z_1$ (不确定自然语言指标)	(0.6, 0.2, 0.1, 0.1, 0)	(0.1, 0.2, 0.3, 0.3, 0.1)	(0.3, 0.5, 0.1, 0.1, 0)
$z_2$ (效益型确定定量指标)/[5,13]/MPa	12	6	10
$z_3$ (成本型确定定量指标)/[10,70]/(°)	20	40	50
$z_4$ (中间型确定定量指标)/[9±2]/MPa	8	10	9
$\otimes(z_5)$ (区间灰数型定量指标)/[0,800]/天	[200, 250]/[200, 210, 250]	[600, 630]/[600, 625, 630]	[420, 480]/[420, 450, 480]

对于表 2 需要说明的是, 本文假设 3 辆车对指标  $z_5$  的白化权函数均是三角白化权函数, 1 号车指标  $z_5$  中的数据 [200, 210, 250] 表示其白化权函数, 则 3 辆车的评估指标按第 2.2 节的方法进行标准化处理, 结果如表 3 所示.

利用 2.1 节计算信息熵及熵权的方法得到各指标

的信息熵及熵权如表 4 所示.

表 3 标准化后的各评估指标值

指标	1 号车	2 号车	3 号车
$z_1$	0.825	0.4751	0.75
$z_2$	0.875	0.125	0.625
$z_3$	0.833	0.5	0.333
$z_4$	0.5	0.5	1
$\tilde{\otimes}(z_5)$	0.725	0.2271	0.4375

表 4 各指标权重值

指标	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$	$z_5$
信息熵	0.023 29	0.182 48	0.062 81	0.053 61	0.090 42
熵权	0.056 46	0.442 25	0.152 23	0.129 91	0.219 15

根据第 3 节的方法对各类型信息证据在同一识别框架下进行基本可信度转换. 其中对于区间灰数型定量证据按照前文所述方法进行, 具体过程如下.

Step 1: 根据工程实际结合专家经验确定该区间灰数型证据的白化权函数以及各健康等级的模糊隶

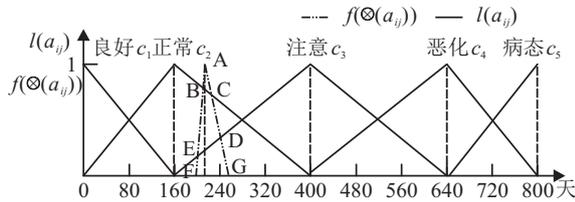


图 4 1 号车指标  $z_5$  的白化权函数与隶属度函数

属度, 以 1 号车指标  $z_5$  为例进行说明, 如图 4 所示.

Step 2: 计算白化权函数与模糊隶属度函数的各个交点坐标. 本例各交点坐标分别为 A(210, 1)、B(208, 0.8)、C(220, 0.75)、D(237.142 9, 0.321 4)、E(201.739 1, 0.173 9)、F(200, 0)、G(250, 0).

Step 3: 计算各健康等级的基本可信度.

$$\beta_{2,15} = \frac{S_{\square BCGF}}{S_{\square BCGF} + S_{\square DEFG} + S_{\triangle ABC}} = 0.795 3,$$

$$\beta_{3,15} = \frac{S_{\square DEFG}}{S_{\square BCGF} + S_{\square DEFG} + S_{\triangle ABC}} = 0.132 5,$$

$$\beta_{2\text{or}3,15} = \frac{S_{\triangle ABC}}{S_{\square BCGF} + S_{\square DEFG} + S_{\triangle ABC}} = 0.072 2.$$

将 3 辆车各指标进行基本可信度分配, 得到结果如表 5 所示.

利用熵权对各个指标证据的基本可信度进行重新修正, 得到修正后的基本可信度如表 6 所示.

表 5 各指标的基本可信度

指标	1 号车	2 号车	3 号车
$z_1$	$m(c_1) = 0.6, m(c_2) = 0.2,$ $m(c_3) = 0.1, m(c_4) = 0.1$	$m(c_1) = 0.1, m(c_2) = 0.2,$ $m(c_3) = 0.3, m(c_4) = 0.3, m(c_5) = 0.1$	$m(c_1) = 0.3, m(c_2) = 0.5,$ $m(c_3) = 0.1, m(c_4) = 0.1$
$z_2$	$m(c_1) = 0.375, m(c_2) = 0.625$	$m(c_4) = 0.625, m(c_5) = 0.375$	$m(c_2) = 0.417, m(c_3) = 0.583$
$z_3$	$m(c_1) = 0.165, m(c_2) = 0.835$	$m(c_3) = 1$	$m(c_3) = 0.444, m(c_4) = 0.556$
$z_4$	$m(c_3) = 1$	$m(c_3) = 1$	$m(c_1) = 1$
$z_5$	$m(c_2) = 0.795 3, m(c_3) = 0.132 5,$ $m(c_2, c_3) = 0.072 2$	$m(c_3) = 0.157 6, m(c_4) = 0.838 8,$ $m(c_3, c_4) = 0.003 6$	$m(c_3) = 0.654 6, m(c_4) = 0.248 8,$ $m(c_3, c_4) = 0.096 6$

表 6 修正后各指标的基本可信度

指标	1 号车	2 号车	3 号车
$z_1$	$m(c_1) = 0.033 9, m(c_2) = 0.011 3,$ $m(c_3) = 0.005 6, m(c_4) = 0.005 6$ $m(\theta) = 0.943 6$	$m(c_1) = 0.005 6, m(c_2) = 0.011 3,$ $m(c_3) = 0.016 9, m(c_4) = 0.016 9$ $m(c_5) = 0.005 6, m(\theta) = 0.943 6$	$m(c_1) = 0.016 9, m(c_2) = 0.028 2,$ $m(c_3) = 0.005 6, m(c_4) = 0.005 6$ $m(\theta) = 0.943 6$
$z_2$	$m(c_1) = 0.165 8, m(c_2) = 0.276 4,$ $m(\theta) = 0.557 8$	$m(c_4) = 0.276 4, m(c_5) = 0.165 8,$ $m(\theta) = 0.557 8$	$m(c_2) = 0.184 4, m(c_3) = 0.257 8,$ $m(\theta) = 0.557 8$
$z_3$	$m(c_1) = 0.025 2, m(c_2) = 0.127,$ $m(\theta) = 0.847 8$	$m(c_3) = 0.152 2, m(\theta) = 0.857 8$	$m(c_3) = 0.067 6, m(c_4) = 0.084 6,$ $m(\theta) = 0.847 8$
$z_4$	$m(c_3) = 0.13, m(\theta) = 0.87$	$m(c_3) = 0.13, m(\theta) = 0.87$	$m(c_3) = 0.13, m(\theta) = 0.87$
$z_5$	$m(c_2) = 0.174 3, m(c_3) = 0.029 1,$ $m(c_2, c_3) = 0.015 8, m(\theta) = 0.780 8$	$m(c_3) = 0.034 6, m(c_4) = 0.183 8,$ $m(c_3, c_4) = 0.000 8, m(\theta) = 0.780 8$	$m(c_3) = 0.143 5, m(c_4) = 0.054 5,$ $m(c_3, c_4) = 0.021 2, m(\theta) = 0.780 8$

最后, 利用式 (1) 将各类型证据合成评估, 得到 3 辆车健康状态的评估结果, 如表 7 所示.

表 7 各车辆健康状态评估结果

车号	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$\theta$	其他
1 号	0.139 3	0.415	0.073 5	0.002 2	0	0.362 8	0.007 3
2 号	0.002 2	0.004 5	0.110 9	0.395 9	0.111 4	0.365 2	0.009 9
3 号	0.006 4	0.132 9	0.424 9	0.067 1	0	0.359	0.009 7

表 7 中“其他”的含义分别为: 1 号车处于良好或正常状态的可信度, 2 号车处于注意或恶化状态的可信度, 3 号车处于注意或恶化状态的可信度. 从表 7 可以看出, 1 号车为正常状态, 2 号车为恶化状态, 3 号车为注意状态. 若需要安排执行任务、训练或者维修, 可参考此结果进行合理统筹.

由对 3 辆车的基本可信度进行的定性分析可以看出: 指标  $z_2$  的权重最大, 远大于其他指标; 其次是指标  $z_5$  的权重, 略大于权重相当的  $z_3$  和  $z_4$ ; 指标  $z_1$  的权重远小于其他指标. 对于 1 号车, 指标  $z_2$ 、 $z_3$ 、 $z_5$  均强烈支持  $c_2$ , 即正常状态, 因此本文评估 1 号车处于正常状态是合理的; 对于 2 号车, 指标  $z_2$ 、 $z_5$  强烈支持  $c_4$ , 指标  $z_3$ 、 $z_4$  支持  $c_3$ , 但修正后指标  $z_3$ 、 $z_4$  大部分信度分配给  $\theta$ , 相对而言  $c_4$  的支持度要大于  $c_3$ , 由于证据理论的合成效果, 评估结果将向  $c_4$  偏移, 本文评估 2 号车处于恶化状态也较为合理, 同理分析 3 号车也反映了本文方法的有效性 with 合理性.

## 5 结 论

实际工程中, 评估决策信息的种类众多, 常见的 3

类信息为不确定型自然语言信息、确定型定量信息以及区间灰数型定量信息. 针对 3 种类型信息的合成评估问题, 通过将各类型信息标准化改进了熵权的应用, 提出了区间灰数型定量指标的基本可信度分配方法. 在实际应用中, 决策者可结合各种信息及自身偏好给出区间灰数型指标的白化权函数, 该方法更加符合实际工程中的应用. 实例计算表明, 该方法可行有效, 除一般系统状态评估外, 还可用于方案优选、投资决策、产品选型等相关评估决策领域, 适用性较好.

### 参考文献(References)

- [1] 段新生. 证据理论与决策、人工智能[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1993: 1-15.  
(Duan X S. Evidence theory and decision making, artificial intelligence[M]. Beijing: Renmin University of China Press, 1993: 1-15.)
- [2] Awasthi A, Chauhan S S. Using AHP and Dempster-Shafer theory for evaluating sustainable transport solution[J]. Environment Modeling and Software, 2011, 26(6): 787-796.
- [3] Zhang Y M, Leung H, Kwak K C, et al. Automated speaker recognition for home service robots using genetic algorithm and Dempster-Shafer fusion technique[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(9): 3058-3068.
- [4] Niu G, Yang B S. Dempster-Shafer regression for multi-step-ahead time-series prediction towards data-driven machinery prognosis[J]. Mechanical System and Signal Processing, 2009, 23(3): 740-751.
- [5] 李磊, 裴风. 基于熵权和证据推理的多属性决策方案评价方法[J]. 合肥工业大学学报, 2010, 33(9): 1396-1401.  
(Li L, Pei F. Evaluation method of multi-attribute decision making plans based on entropy weight and evidence reasoning[J]. J of Hefei University of Technology, 2010, 33(9): 1396-1401.)
- [6] 尹德进, 王宏力. 基于信息熵与证据推理的不确定多属性决策方法[J]. 计算机应用, 2011, 31(5): 1308-1310.  
(Yin D J, Wang H L. Uncertain multi-attribute decision making method based on entropy and evidential reasoning approach[J]. J of Computer Application, 2011, 31(5): 1308-1310.)
- [7] 王坚强, 何波. 基于证据推理的信息不完全的多准则决策方法及应用[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(4): 659-661.  
(Wang J Q, He B. Method for multi-criteria decision with indefinite information based on evidential reasoning and its application[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(4): 659-661.)
- [8] Yang J B, Wang Y M, Xu D L, et al. The evidential reasoning approach for MADA under both probabilistic and fuzzy uncertainties[J]. European J of Operational Research, 2006, 171(1): 309-343.
- [9] Xu D L, Yang J B, Wang Y M. The evidential reasoning approach for multi-attribute decision analysis under interval uncertainty[J]. European J of Operational Research, 2006, 174(1): 1914-1943.
- [10] 万俊, 邢焕革, 张晓晖. 基于熵理论的多属性决策专家权重调整方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(6): 907-910.  
(Wan J, Xing H G, Zhang X H. Algorithm of adjusting weights of decision-makers in multi-attribute group decision-making based on entropy theory[J]. Control and Decision, 2010, 25(6): 907-910.)
- [11] 陈孝新. 一种基于证据推理的混合型灰色多属性群决策方法[J]. 控制与决策, 2011, 26(6): 831-836.  
(Chen X X. Hybrid multiple attribute group decision-making method based on evidential reasoning approach[J]. Control and Decision, 2011, 26(6): 831-836.)
- [12] 杨风暴, 王肖霞. D-S 证据理论的冲突证据合成方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 30-38.  
(Yang F B, Wang X X. Combination method of conflictive evidence in D-S evidence theory[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 30-38.)
- [13] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004: 12-16.  
(Deng J L. The basic method of grey system[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2004: 12-16.)
- [14] 袁潮清, 刘思峰, 张可. 基于发展趋势和认知程度的区间灰数预测[J]. 控制与决策, 2011, 26(2): 313-315.  
(Yuan C Q, Liu S F, Zhang K. Prediction model for interval grey number based on trend and cognition[J]. Control and Decision, 2011, 26(2): 313-315.)
- [15] 黄英艺, 蔡光程, 刘文奇. 基于区间灰数的多属性决策方法[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(4): 136-138.  
(Huang Y Y, Cai G C, Liu W Q. Multi-attribute decision making method based on interval gray numbers. Computer Engineering and Application, 2010, 46(4): 136-138.)
- [16] 曾波, 刘思峰, 崔杰. 白化权函数已知的区间灰数预测模型[J]. 控制与决策, 2010, 25(12): 1815-1820.  
(Zeng B, Liu S F, Cui J. Prediction model for interval grey number with known whitenization weight function[J]. Control and Decision, 2010, 25(12): 1815-1820.)
- [17] 刘思峰, 方志耕, 谢乃明. 基于核和灰度的区间灰数运算法则[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2): 313-316.  
(Liu S F, Fang Z G, Xie N M. Algorithm rules of interval grey numbers based on the "Kernel" and the degree of greyiness of grey numbers[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(2): 313-316.)