

# 基于共识与 Choquet 积分的模糊 Petri 网可信度确定方法\*

朱江洪<sup>a,b</sup>, 李延来<sup>a,b</sup>, 王睿<sup>a,b</sup>

(西南交通大学 a. 交通运输与物流学院; b. 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 成都 610031)

**摘要:** 针对模糊 Petri 网可信度确定过程中决策结果可接受程度较低和未考虑影响因子间关联的问题, 提出基于群体共识测度与 Choquet 积分确定模糊 Petri 网可信度的方法。设计了基于决策者与群体评估信息偏差修正的自适应共识测度算法, 获取可接受程度较高的群体评估信息。构建最大 2-可加模糊测度 Marichal 熵模型求解影响因子间的交互作用系数, 根据交互作用系数、默比乌斯变换和模糊测度之间的关系确定模糊测度, 利用 Choquet 积分算子集结群体评估信息得到模糊 Petri 网可信度。将此方法用于确定燃气轮机故障诊断模糊 Petri 网输入库所可信度, 并与未考虑共识测度和影响因子间关联的方法进行比较, 计算结果验证了该方法的有效性和可行性。

**关键词:** 模糊 Petri 网; 可信度; 共识测度; 模糊测度; Choquet 积分

**中图分类号:** TP307; C934

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-3695(2018)06-1700-07

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2018.06.022

## Method for determining credibility of fuzzy Petri net based on consensus and Choquet integration

Zhu Jianghong<sup>a,b</sup>, Li Yanlai<sup>a,b</sup>, Wang Rui<sup>a,b</sup>

(a. School of Transportation & Logistics, b. National United Engineering Laboratory of Integrated & Intelligent Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In the process of determining the credibility of fuzzy Petri net, the result of the decision making is lower and the correlation between the influence factors is unconsidered, this paper put forward a method of determining the fuzzy Petri net credibility based on group consensus measure and Choquet integral. It designed the adaptive consensus algorithm based on the decision maker and the group evaluation information error correction, and obtained the group evaluation information which could be accepted by the algorithm. It solved the interaction coefficient of the influence factors by the biggest 2-additive fuzzy measure Marichal entropy model. According to the relationship between the interaction coefficient, Mobius transform and fuzzy measure to determine the fuzzy measure, it obtained the fuzzy Petri net credibility by aggregating group evaluation information by using Choquet integral. It verified the validity and feasibility of this method by the case of determine the gas turbine fault diagnosis fuzzy Petri net input place credibility in comparison with a method of not consider the consensus measure and the correlation of influence factors.

**Key words:** fuzzy Petri net; credibility; consensus measure; fuzzy measure; Choquet integral

## 0 引言

Looney<sup>[1]</sup>提出的模糊 Petri 网同时具有 Petri 网的图形化描述<sup>[2]</sup>和模糊集的能力, 是一种非常适用于基于规则的专家知识建模技术<sup>[3,4]</sup>。由于模糊 Petri 网能更好地描述专家系统的不确定性和模糊性信息<sup>[5]</sup>, 吸引了学者和实践者的关注, 并已广泛应用于故障诊断<sup>[6,7]</sup>、生产计划<sup>[8]</sup>、时序控制<sup>[9]</sup>和食道癌预测<sup>[10]</sup>等领域。模糊 Petri 网的输入库所可信度通常由决策者根据经验赋值, 但却鲜有学者对模糊 Petri 网输入库所可信度的确定展开研究。在应用模糊 Petri 网对基于规则的专家系统进行建模时, 无论采用何种完美的推理算法, 如果输入库所可信度不准确, 可能会推断出错误的目标库所可信度。因此, 采用何种有效且合理的方法引导决策者确定输入库所可信度,

对后续的推理和决策极为关键。

为此仅有少量文献对确定模糊 Petri 网输入库所的可信度进行了研究, 文献[11]利用从燃气轮机系统收集的数据样本, 通过数据的去模糊化而得到输入库所的可信度, 但却未明确给出具体的可信度确定方法。文献[7]运用模糊证据推理和动态自适应模糊 Petri 网的方法, 提出一种故障诊断及因果分析的模型, 并采用模糊证据推理的方法获取和集结领域专家不完全评估信息, 进而确定输入库所的可信度。文献[12]构建了一种群体决策模型, 模型中决策者以语言变量给出评估信息, 并转换为区间二元语义形式, 再利用 ITWA (interval 2-tuple weighted averaging, ITWA) 和 ITWG (interval 2-tuple weighted geometric, ITWG) 算子分别集结决策者信息和影响因子信息以获取输入库所的可信度。上述文献提出的方法在一定程度上解

收稿日期: 2017-02-18; 修回日期: 2017-04-24 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71371156)

作者简介: 朱江洪(1986-), 男, 重庆人, 博士研究生, 主要研究方向为决策理论与方法(zhujianghong2018@163.com); 李延来(1971-), 男, 河北昌黎人, 教授, 博士, 主要研究方向为决策理论与方法; 王睿(1992-), 男, 江西吉安人, 博士研究生, 主要研究方向为决策理论与方法。

决了模糊 Petri 网应用中输入库所可信度的确定问题,但仍然存在以下不足:a)群体决策虽然克服了单人决策的武断性,但在群体决策过程中均没有考虑决策者之间能否达成共识形成一致的群体评估信息;b)虽然文献[12]考虑了多个影响因子对输入库所可信度的影响,但却忽略了影响因子之间的关联关系以及权重对评估结果的影响。

综上所述,本文综合应用共识测度、区间熵和模糊测度的方法,提出了一种考虑群体决策者共识测度与影响因子存在关联关系的模糊 Petri 网输入库所可信度确定方法。该方法通过构建一种自适应修正的共识决策方法以获取群体评估信息,运用区间熵的方法计算影响因子之间的权重,利用交互作用系数、默比乌斯变换和模糊测度之间的关系确定模糊测度,基于 Choquet 积分集结群体评估信息以确定可信度。

## 1 基础知识

### 1.1 模糊 Petri 网

定义 1<sup>[1,13]</sup> 模糊 Petri 网定义为一个九元组:

$$\text{FPN} = (P, T, D, I, O, f, \alpha, \beta, M) \quad (1)$$

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$  为有限非空的  $m$  个库所集合,  $P = P_S \cup P_I \cup P_T$ ,  $P_S = \{p \in P \mid p^* = \emptyset \text{ 且 } p^* \neq \emptyset\}$  为输入库所集合,  $P_I = \{p \in P \mid p^* \neq \emptyset \text{ 且 } p^* \neq \emptyset\}$  为中间库所集合,  $P_T = \{p \in P \mid p^* \neq \emptyset \text{ 且 } p^* = \emptyset\}$  为终止库所集合,  $p^*$  和  $p^*$  分别表示库所  $p$  的输入变迁集合和输出变迁集合。

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  为有限非空的  $n$  个变迁集合。

$D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$  为有限非空的  $m$  个命题集合,  $|P| \cap |T| \cap |D| = \emptyset$ ,  $|P| = |D|$ 。

$I: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$  定义为由库所指向变迁的有向弧构成的  $m \times n$  的输入关联矩阵, 其中:

$$I_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{有向弧由 } p_i \text{ 指向 } t_j \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$$

$O: T \times P \rightarrow \{0, 1\}$  定义为由变迁指向库所的有向弧构成的  $m \times n$  的输出关联矩阵, 其中:

$$O_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{有向弧由 } t_j \text{ 指向 } p_i \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$$

$f: T \rightarrow [0, 1]$  为关联函数, 表示由变迁到  $[0, 1]$  之间的映射。

$\alpha: P \rightarrow [0, 1]$  为库所  $P$  的关联函数, 表示由库所到  $[0, 1]$  之间的映射。

$\beta: P \rightarrow D$  为库所与命题之间的双射。

$M: M = (\alpha(p_1), \alpha(p_2), \dots, \alpha(p_m))$  为标志, 初始标志为  $M_0 = (\alpha(p_1), \alpha(p_2), \dots, \alpha(p_m)), \alpha(p_m)$  为库所  $p_m$  的可信度。

### 1.2 区间二元语义

定义 2<sup>[14]</sup> 假设  $S = \{s_0, s_1, \dots, s_g\}$  为一语义术语集。 $[(s_a, \varphi), (s_b, \kappa)]$  为一区间二元语义变量, 其中  $(s_a, \varphi) \leq (s_b, \kappa)$ ,  $s_a, s_b$  和  $\varphi, \kappa$  分别表示  $S$  中的语言标签和符号转换。一个区间二元语义变量可按式(2)转换为区间数  $\Delta[\beta_1, \beta_2] = [(s_a, \varphi), (s_b, \kappa)]$ 。

$$\begin{cases} s_a, a = \text{round}(\beta_1 \cdot g) \\ s_b, b = \text{round}(\beta_2 \cdot g) \\ \varphi = \beta_1 - \frac{a}{g}, \varphi \in [-\frac{1}{2g}, \frac{1}{2g}) \\ \kappa = \beta_2 - \frac{b}{g}, \kappa \in [-\frac{1}{2g}, \frac{1}{2g}) \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $\text{round}(\cdot)$  是四舍五入取整运算;  $\Delta^{-1}$  为函数  $\Delta$  的逆函

数, 将区间二元语义  $[(s_a, \varphi), (s_b, \kappa)]$  转换为区间数  $[\beta_1, \beta_2]$ 。

$$\Delta^{-1}[(s_a, \varphi), (s_b, \kappa)] = \left[ \frac{a}{g} + \varphi, \frac{b}{g} + \kappa \right] = [\beta_1, \beta_2] \quad (3)$$

特别地, 二元语义变量是区间二元语义变量的特例, 即  $(s_a, \varphi) = [(s_a, \varphi), (s_a, \varphi)]$ 。

## 2 模糊 Petri 网可信度确定方法

本文确定模糊 Petri 网输入库所可信度的基本思路为: 首先, 设计一种自适应共识测度算法, 以获取群体决策者满意的群体评估矩阵; 其次, 引入区间二元语义熵计算输入库所各影响因子的权重; 最后, 在确定影响因子间模糊测度的条件下, 基于 ITCA(interval 2-tuple correlated averaging)算子<sup>[15]</sup>集结群体评估信息得到输入库所的可信度。

### 2.1 问题描述

在确定模糊 Petri 网输入库所可信度的过程中, 设由  $p$  位决策者  $DM_k (k=1, 2, \dots, p)$  组成的专家评估团队在考虑每个输入库所  $IP_i (i=1, 2, \dots, m)$  的可信度受有限影响因子集  $IF_j (j=1, 2, \dots, N_i)$  影响下, 对  $m$  个输入库所  $IP_i$  的可信度进行评估。 $W = (w_1, w_2, \dots, w_p)$  为决策者权重, 表示决策者在此次评估中的重要程度, 并满足  $w_k \in [0, 1]$  且  $\sum_{k=1}^p w_k = 1$ 。 $\rho_i = (\rho_{i1}, \rho_{i2}, \dots, \rho_{iN_i})$  为输入库所  $IP_i$  所对应影响因子的权重, 满足  $\rho_{ij} \in [0, 1]$  且  $\sum_{j=1}^{N_i} \rho_{ij} = 1$ 。 $S = \{s_0, s_1, \dots, s_g\}$  为语义术语集, 决策者  $k$  以区间二元语义形式表征的评估矩阵为

$$Q^k = \begin{bmatrix} q_{11}^k & q_{12}^k & \dots & q_{1N_1}^k \\ q_{21}^k & q_{22}^k & \dots & q_{2N_2}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{m1}^k & q_{m2}^k & \dots & q_{mN_m}^k \end{bmatrix} \quad k=1, 2, \dots, p \quad (4)$$

其中:  $q_{ij}^k = [(s_i, \varphi), (s_j, \kappa)]$  为决策者  $k$  在考虑影响因子  $IF_j$  下表征的输入库所可信度评估值。在实践中为了更加符合实际情况, 输入库所  $IP_i$  与  $IP_y (y=1, 2, \dots, N_y)$  所考虑的影响因子数  $N_i$  与  $N_y (i \neq y)$  不全相等。

因此, 拟研究的问题为: 决策者  $k$  以区间二元语义形式给出输入库所可信度评估矩阵  $Q^k$ , 考虑专家评估团队共识度和影响因子关联情形下, 如何更合理地确定模糊 Petri 网输入库所的可信度?

### 2.2 自适应共识测度决策方法

在群决策环境中, 每个决策者均来自不同的专业领域、拥有不完全相同的知识背景和水平, 使得决策者表征的决策信息存在差异。若不考虑单个决策者与群体决策之间的协同水平, 进而集结决策者信息作出决策, 单个决策者可能因个人意见未被充分采纳而不接受最终的决策结果, 因此, 在集结决策者信息之前, 使群体达成一定共识就显得尤为重要<sup>[16,17]</sup>。为此, 基于文献[18]中共识测度的定义和欧氏距离给出了共识测度的概念。

定义 3 设决策者  $k$  的评价矩阵为  $Q^k = (q_{ij}^k)_{m \times N_i} (k=1, 2, \dots, p)$ , 由 ITWA(interval 2-tuple weighted averaging)算子<sup>[14]</sup>集结决策者评估信息得群体决策评估矩阵为  $Q^c = (q_{ij}^c)_{m \times N_i}$ , 则称

$$CM(Q^1, Q^2, \dots, Q^p) = \frac{1}{pm} \sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^m \left( 1 - \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} d(q_{ij}^k, q_{ij}^c) \right) \quad (5)$$

为群体共识测度,  $CM$  值越大, 则群体共识度越高, 其中  $d(q_{ij}^k, q_{ij}^c)$  为根据文献[19]确定的  $q_{ij}^k$  与  $q_{ij}^c$  间的欧氏距离。

在群体决策过程中, 若群体共识测度  $CM$  小于其预先设置的共识测度阈值  $\xi$ , 则决策者群体未能达成满意共识, 应向决策者提供修正其评估值的建议, 以确保提高下一轮群体决策的

群体共识测度。因此,设计了一种基于决策者 $k$ 与群体决策评估值差值的修正建议策略,构建了一种自适应区间二元语义共识确定方法,并称为自适应共识测度算法。

#### 算法1 自适应共识测度算法

输入:决策者评估矩阵 $Q^k = (q_{ij}^k)_{m \times N_i}$ ,决策者权重向量 $W$ ,群体共识测度阈值 $\xi$ 。

输出:修正后决策者评估矩阵 $\tilde{Q}^k = (\tilde{q}_{ij}^k)_{m \times N_i}$ ,修正后群体评估矩阵 $\tilde{Q}^c = (\tilde{q}_{ij}^c)_{m \times N_i}$ 。

a)根据决策者评估矩阵 $Q^k = (q_{ij}^k)_{m \times N_i}$ 和决策者权重向量 $W$ ,利用ITWA算子集获取群体评估矩阵 $Q^c = (q_{ij}^c)_{m \times N_i}$ 。

b)计算决策者 $k$ 的评估值 $q_{ij}^k$ 与群体评估值 $q_{ij}^c$ 之间的距离 $d(q_{ij}^k, q_{ij}^c)$ ,按式(5)确定群体共识测度 $CM$ ,若 $CM \geq \xi$ ,则算法停止,转步骤d),否则转步骤c)。

c)计算决策者评估值 $q_{ij}^k$ 与群体评估值 $q_{ij}^c$ 之差值 $r_{ij}^k = \Delta[\Delta^{-1}(s_r^{kc}, \varphi^{kc}), \Delta^{-1}(s_v^{kc}, \kappa^{kc})]$ ,令 $a = \text{fix}(g \times \Delta^{-1}(s_r^{kc}, \varphi^{kc}))$ 和 $b = \text{fix}(g \times \Delta^{-1}(s_v^{kc}, \kappa^{kc}))$ 。其中, $\text{fix}(x)$ 为截取小数取整函数。若 $\forall i = 1, 2, \dots, m, \forall j = 1, 2, \dots, N_i, \forall k = 1, 2, \dots, p$ ,有 $a = 0$ 且 $b = 0$ ,则转步骤d);否则决策者 $k$ 的评估值修正为 $\tilde{q}_{ij}^k = [(s_{r-a}^{kc}, \varphi^k), (s_{v-b}^{kc}, \kappa^k)]$ ,然后转步骤a)。

d)令 $\tilde{Q}^k = Q^k$ 和 $\tilde{Q}^c = Q^c$ ,输出 $\tilde{Q}^k$ 和 $\tilde{Q}^c$ 。

### 2.3 熵权法确定影响因子权重

熵用于度量信息的不确定性程度,信息量越小,不确定性越大,熵值越大;反之信息量越大,不确定性越小,熵值越小,因此,熵权法是一种广泛应用于确定属性客观权重的方法。引入文献[20,21]中区间熵的方法确定影响因子权重。

定义4<sup>[20,21]</sup> 设 $q_{ij} = [(\rho_{ij}, \delta_{ij}), (\varphi_{ij}, \kappa_{ij})]$ 为区间二元语义,其区间值为 $[\alpha_{ij}, \beta_{ij}] = \Delta^{-1}[(\rho_{ij}, \delta_{ij}), (\varphi_{ij}, \kappa_{ij})]$ ,则称

$$e_{ij}^L = \min\{-\alpha_{ij} \ln \alpha_{ij}, -\beta_{ij} \ln \beta_{ij}\} \quad (6)$$

$$e_{ij}^U = \max\{-\alpha_{ij} \ln \alpha_{ij}, -\beta_{ij} \ln \beta_{ij}\} \quad (7)$$

式(6)和(7)分别为区间二元语义区间熵 $E_{ij} = [e_{ij}^L, e_{ij}^U]$ 的下界和上界, $E_{ij} = [e_{ij}^L, e_{ij}^U]$ 为区间二元语义区间熵。

根据区间二元语义区间熵 $E_{ij} = [e_{ij}^L, e_{ij}^U]$ ,可得输入库所 $IP_i$ 的影响因子 $IF_j$ 的权重为

$$\eta_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - e_{ij}^U}{\sum_{j=1}^{N_i} (1 - e_{ij}^L)} + \frac{1 - e_{ij}^L}{\sum_{j=1}^{N_i} (1 - e_{ij}^U)} \right) \quad (8)$$

因此,可得输入库所 $IP_i$ 影响因子 $IF_j$ 的标准化权重为

$$\rho_{ij} = \frac{\eta_{ij}}{\sum_{j=1}^{N_i} \eta_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, N_i \quad (9)$$

### 2.4 确定模糊测度的极大熵模型法

文献[22]最早提出采用较弱的连续性和单调性替代可加性的集函数,用于度量事物间的关联性。文献[23]通过对模糊测度文献的综述,得出可用模糊测度度量事物间的互补/冗余关联、相关关联和偏好关联的关联关系。本文借助模糊测度用于刻画影响因子间的互补/冗余关联关系对输入库所可信度的影响,并构建极大熵模型确定模糊测度。

定义5<sup>[24]</sup> 设非空有限集合 $F$ 的幂集为 $P(F)$ ,则称函数 $\mu: P(F) \rightarrow [0, 1]$ 为模糊测度,且满足以下公理:

a) $\mu(\emptyset) = 0, \mu(F) = 1$ ;

b)若 $A \in P(F), B \in P(F), A \subseteq B$ ,则 $\mu(A) \leq \mu(B)$ 。

定义6<sup>[24]</sup> 称模糊测度 $\mu$ 是 $k$ 阶可加的,若 $\forall A \subset X, |A| > k, m(A) = 0$ ,则至少存在一个子集 $A \subset F$ 且 $|A| = k$ ,使得 $m(A) \neq 0$ 。

定义7<sup>[24]</sup> 设非空集合 $F$ 的幂集为 $P(F), \forall T \in P(F)$ ,则定义 $\mu(T)$ 的默比乌斯变换为

$$m(T) = \sum_{S \subset T} (-1)^{|T \setminus S|} \mu(S), \forall T \subset F \quad (10)$$

由式(10)反知对于任一集函数 $\mu$ 均可由其默比乌斯变换

形式 $m$ 表示,即

$$\mu(S) = \sum_{T \subset S} m(T), \forall S \subset F \quad (11)$$

但任意的 $2^n$ 个参数 $m(T)_{T \subset F}$ 并非一定唯一确定一个2-可加模糊测度,因此文献[24]给出如下定理。

定理1 设非空有限集合 $F$ 上的默比乌斯变换为 $m$ ,2-可加模糊测度由 $2^n$ 个参数 $m(T)_{T \subset F}$ 唯一确定,其充分必要条件如下:

a) $m(\emptyset) = 0, \sum_{T \subset F} m(T) = 1$ ;

b) $\forall T \subset F, \forall i \in T$ ,有 $\sum_{S \subset T, i \in S} m(S) \geq 0$ ;

c) $\forall T \subset F$ 且 $|T| > 2$ 均有 $m(T) = 0$ ,并且至少存在一个子集 $S, |S| = 2$ ,使得 $m(S) \neq 0$ 。

定义8<sup>[24]</sup> 设非空有限集合 $F$ 的幂集 $P(F)$ 的模糊测度定义为 $\mu$ ,则对 $\forall f_j \in F$ 的单个影响因子,其Shapley值为

$$I(f_j) = \sum_{S \subset F \setminus f_j} \frac{(N_i - |S| - 1)! |S|!}{N_i!} \times [\mu(S \cup f_j) - \mu(S)] \quad (12)$$

其中: $I(f_j)$ 是单个影响因子的相对重要性且满足 $\sum_{j=1}^{N_i} I(f_j) = 1$ 。更一般地,对于 $\forall S \subset F$ 所含的 $|S|$ 个影响因子间的交互作用系数为

$$I(S) = \sum_{T \subset S \setminus S} \frac{(N_i - |T| - |S|)!}{(N_i - |S| + 1)!} \sum_{V \subset S} (-1)^{|S \setminus V|} \mu(T \cup V) \quad (13)$$

定理2<sup>[24]</sup> 设 $\mu$ 为非空有限集合 $F$ 的幂集 $P(F)$ 上的模糊测度, $m$ 和 $I$ 分别为其默比乌斯变换和交互作用系数,对于 $\forall S \subset F$ 有

$$I(S) = \sum_{T \subset F \setminus S} \frac{m(S \cup T)}{2^{|T|} + 1} \quad (14)$$

根据定理2可知,对于2-可加模糊测度可得如下结论:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = I(\emptyset) - \frac{1}{2} \sum_{f_j \in F} I(f_j) + \frac{1}{6} \sum_{\{f_i, f_j\} \subset F} I(f_i, f_j) \\ m(f_j) = I(f_j) - \frac{1}{2} \sum_{f_i \in F \setminus f_j} I(f_i, f_j) \\ m(f_i, f_j) = I(f_i, f_j) \\ m(S) = 0, \text{当 } |S| > 2 \end{cases} \quad (15)$$

定理3<sup>[25]</sup> 设影响因子集为非空有限集合 $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ ,则可确定唯一一个2-可加模糊测度,影响因子幂集 $P(F)$ 上的 $2^n$ 个交互作用系数应满足如下条件:

a) $\forall f_j \in F$ ,有 $I(f_j) \geq 0$ 且 $\sum_{j=1}^n I(f_j) = 1$ ;

b) $\forall \{f_i, f_j\} \subset F, |I(f_i, f_j)| \leq 2I(f_j)/(N_i - 1)$ ;

c) $\forall S \subset F$ 且 $|S| > 2$ ,有 $I(S) = 0$ ,并且 $\exists T \subset F, |T| = 2$ ,使得 $I(T) \neq 0$ 。

定义9<sup>[26]</sup> 设影响因子集 $F$ 上的模糊测度为 $\mu$ ,则称

$$E_M(\mu) = \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{S \subset F \setminus f_j} \frac{(N_i - |S| - 1)! |S|!}{N_i!} \times g[\mu(S \cup f_j) - \mu(S)] \quad (16)$$

为Marichal熵,其中 $g(x) = -x \ln(x)$ 。

联合式(16)和默比乌斯与模糊测度间的转换关系式(11)及默比乌斯与交互作用系数间的转换关系式(14),可得2-可加模糊测度Marichal熵的交互作用系数表达式为

$$E_M(\mu) = \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{S \subset F \setminus f_j} \frac{(N_i - |S| - 1)! |S|!}{N_i!} \times g \left[ I(f_j) - \frac{1}{2} \left( \sum_{a_j \in A \setminus S} I(f_i, f_j) - \sum_{f_j \in S} I(f_i, f_j) \right) \right] \quad (17)$$

模糊测度所含有的不确定性越大,则2-可加模糊测度Marichal熵值越大,也即信息量越大。为此,可构造如下非线性规划模型求解确定交互作用系数值

$$\max z = \sum_{j=1}^N \sum_{S \subset F \setminus f_j} \frac{(N - |S| - 1)! |S|!}{N!} \times$$

$$g[I(f_j) - \frac{1}{2}(\sum_{a_j \in A \setminus S} I(f_i, f_j) - \sum_{f_j \in S} I(f_i, f_j))] \\ \text{s. t. } \begin{cases} I(f_j) = \rho_{ij} \\ I(f_i, f_j) \in \tilde{T}_{ij} \\ i, j = 1, 2, \dots, N_i \text{ 且 } i \neq j \end{cases} \quad (18)$$

综上所述,基于共识测度与影响因子关联的模糊 Petri 网输入库所可信度确定方法的步骤如下:

a) 获取决策者区间二元语义评价矩阵  $Q^k = (q_{ij}^k)_{m \times N_i}$ , 决策者权重向量  $W$  和群体共识测度阈值  $\xi$ 。

b) 执行自适应共识测度算法, 可得满足群体共识阈值的修正后群体评估矩阵  $\tilde{Q} = (\tilde{q}_{ij}^c)_{m \times N_i}$ 。

c) 由式(6)和(7)计算区间二元语义熵  $E_j$ , 再依据式(8)和(9)确定输入库所影响因子标准化权重  $\rho_{ij}$ 。

d) 根据定理 3, 令  $T_{ij} = \min\{2I(f_i)/(N_i - 1), 2I(f_j)/(N_i - 1)\}$ , 即  $I(f_i, f_j) \in [-T_{ij}, T_{ij}]$ 。评估团队将影响因子间的交互关系划分为冗余、独立和互补三种关系, 将区间  $[-T_{ij}, T_{ij}]$  三等分为  $[-T_{ij}, -T_{ij}/3]$ ,  $[-T_{ij}/3, T_{ij}/3]$ ,  $[T_{ij}/3, T_{ij}]$ , 分别表示三种交互作用系数的取值范围, 记  $\tilde{T}_{ij}$  为评估团队最终确定的关系区间。

e) 构建并求解极大熵模型式(18), 得出交互作用系数取值, 进而根据式(15)和(11)依次获取默比乌斯值  $m$  和模糊测度值  $\mu$ 。

f) 根据修正后的群体评估矩阵  $\tilde{Q} = (\tilde{q}_{ij}^c)_{m \times N_i}$ , 基于 ITCA 算子集结群体评估值以得到  $IP_i$  的可信度值  $q_i = [(\rho_i, \delta_i), (\varphi_i, \kappa_i)]$ , 由  $\alpha(IP_i) = (\Delta^{-1}(\rho_i, \delta_i) + \Delta^{-1}(\varphi_i, \kappa_i))/2$  计算  $IP_i$  的可信度值  $\alpha(IP_i)$ 。

### 3 案例分析

本章以文献[12]中基于模糊 Petri 网的燃气轮机故障诊

断的输入库所可信度确定为例, 验证本文所提方法的可行性和有效性。燃气轮机作为一种重要的动力设备, 已广泛应用于现代飞机推进系统和电力系统。及时、准确地识别燃气轮机各部件的故障状态, 以保证和维持系统安全可靠、平稳运行, 降低运行维护成本具有重要意义。为了使采用模糊 Petri 网的故障诊断技术得到的结论更加贴近于实际, 组建了由五位决策者的评估团队对输入库所的可信度进行评估。燃气轮机故障诊断模糊 Petri 网模型如图 1 所示。由图 1 可知库所  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  为输入库所 ( $IP_1, IP_2, \dots, IP_5$ ), 每个输入库所分别受到 2, 3, 1, 4, 2 个影响因子的影响。

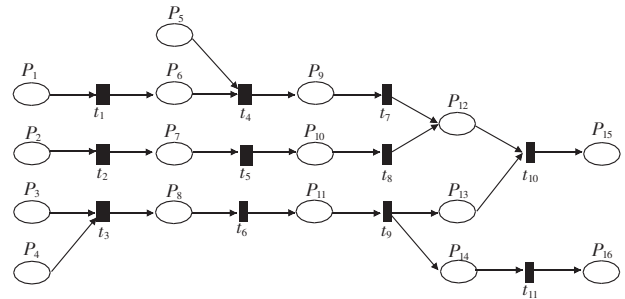


图 1 燃气轮机故障诊断 Petri 网模型

采用本文所提出的基于共识和 Choquet 积分的模糊 Petri 网输入库所可信度确定方法获取燃气轮机模糊 Petri 网输入库所可信度, 其简要步骤如下:

a) 决策者采用七粒度语义术语集  $S = \{\text{很低}(s_0), \text{低}(s_1), \text{中低}(s_2), \text{中等}(s_3), \text{中高}(s_4), \text{高}(s_5), \text{很高}(s_6)\}$ , 以区间二元语义的形式给出输入库所各影响因子下的评估信息, 如表 1 所示。决策者权重向量取文献[12]中所确定的权重向量  $W = (0.161, 0.228, 0.218, 0.209, 0.184)$ , 群体共识阈值  $\xi = 0.9$ 。

表 1 决策者评估信息

输入库所	决策者	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$
$IP_1$	$DM_1$	$[(s_5, 0), (s_5, 0)]$	$[(s_4, 0), (s_6, 0)]$	-	-
	$DM_2$	$[(s_4, 0), (s_6, 0)]$	$[(s_4, 0), (s_4, 0)]$	-	-
	$DM_3$	$[(s_5, 0), (s_5, 0)]$	$[(s_4, 0), (s_5, 0)]$	-	-
	$DM_4$	$[(s_4, 0), (s_6, 0)]$	$[(s_4, 0), (s_4, 0)]$	-	-
	$DM_5$	$[(s_5, 0), (s_5, 0)]$	$[(s_3, 0), (s_6, 0)]$	-	-
$IP_2$	$DM_1$	$[(s_2, 0), (s_2, 0)]$	$[(s_0, 0), (s_5, 0)]$	$[(s_0, 0), (s_2, 0)]$	-
	$DM_2$	$[(s_2, 0), (s_2, 0)]$	$[(s_4, 0), (s_4, 0)]$	$[(s_3, 0), (s_3, 0)]$	-
	$DM_3$	$[(s_2, 0), (s_3, 0)]$	$[(s_4, 0), (s_4, 0)]$	$[(s_3, 0), (s_3, 0)]$	-
	$DM_4$	$[(s_0, 0), (s_2, 0)]$	$[(s_4, 0), (s_5, 0)]$	$[(s_3, 0), (s_3, 0)]$	-
	$DM_5$	$[(s_2, 0), (s_2, 0)]$	$[(s_5, 0), (s_5, 0)]$	$[(s_2, 0), (s_3, 0)]$	-
$IP_3$	$DM_1$	$[(s_0, 0), (s_3, 0)]$	-	-	-
	$DM_2$	$[(s_3, 0), (s_3, 0)]$	-	-	-
	$DM_3$	$[(s_2, 0), (s_2, 0)]$	-	-	-
	$DM_4$	$[(s_3, 0), (s_4, 0)]$	-	-	-
	$DM_5$	$[(s_0, 0), (s_5, 0)]$	-	-	-
$IP_4$	$DM_1$	$[(s_3, 0), (s_3, 0)]$	$[(s_0, 0), (s_4, 0)]$	$[(s_2, 0), (s_2, 0)]$	$[(s_2, 0), (s_6, 0)]$
	$DM_2$	$[(s_3, 0), (s_3, 0)]$	$[(s_4, 0), (s_4, 0)]$	$[(s_2, 0), (s_3, 0)]$	$[(s_3, 0), (s_3, 0)]$
	$DM_3$	$[(s_2, 0), (s_6, 0)]$	$[(s_4, 0), (s_4, 0)]$	$[(s_2, 0), (s_2, 0)]$	$[(s_2, 0), (s_2, 0)]$
	$DM_4$	$[(s_3, 0), (s_4, 0)]$	$[(s_0, 0), (s_4, 0)]$	$[(s_2, 0), (s_2, 0)]$	$[(s_2, 0), (s_3, 0)]$
	$DM_5$	$[(s_5, 0), (s_5, 0)]$	$[(s_4, 0), (s_4, 0)]$	$[(s_0, 0), (s_3, 0)]$	$[(s_2, 0), (s_2, 0)]$
$IP_5$	$DM_1$	$[(s_6, 0), (s_6, 0)]$	$[(s_3, 0), (s_6, 0)]$	-	-
	$DM_2$	$[(s_5, 0), (s_5, 0)]$	$[(s_4, 0), (s_4, 0)]$	-	-
	$DM_3$	$[(s_5, 0), (s_6, 0)]$	$[(s_4, 0), (s_4, 0)]$	-	-
	$DM_4$	$[(s_6, 0), (s_6, 0)]$	$[(s_5, 0), (s_6, 0)]$	-	-
	$DM_5$	$[(s_4, 0), (s_6, 0)]$	$[(s_4, 0), (s_4, 0)]$	-	-

b) 执行自适应共识测度算法, 得到满足群体共识阈值的修正后群体评估矩阵。

(a) 由决策者评估矩阵  $Q^k$  和决策者权重向量  $W$ , 利用文献[14]中的 ITWA 算子集结获取群体评估矩阵  $\tilde{Q}$ , 如表 2 所示。

(b) 计算决策者  $k$  的评估值  $q_{ij}^k$  与群体评估值  $q_{ij}^c$  之间的距离, 由式(5)确定群体共识测度  $CM = 0.8659$ , 因  $CM < \xi$  ( $\xi = 0.9$ ), 进入修正阶段。

(c) 计算决策者评估值  $q_{ij}^k$  与群体评估值  $q_{ij}^c$  之间的差值

$r_{ij}^k = \Delta[\Delta^{-1}(s_r^{kc}, \varphi^{kc}), \Delta^{-1}(s_v^{kc}, \kappa^{kc})]$ , 其结果如表 3 所示。以决策者  $DM_3$  对影响因子  $F_1$  下输入库所  $IP_4$  的评估值为例说明具体的修正方法: 由表 3 可知,  $a = \text{fix}(6 \times (-0.1917)) = \text{fix}(-1.1502) = -1$  和  $b = \text{fix}(6 \times 0.2948) = \text{fix}(1.7688) = 1$ 。修正前  $q_{41}^3 = [(s_2, 0), (s_6, 0)]$ , 则修正后  $q_{41}^3 = [(s_{2-a}, 0), (s_{6-b}, 0)] = [(s_3, 0), (s_5, 0)]$ 。依照此方法对决策者的其余评估值进行修正, 得到决策者修正后的评估值后转下一步。

表 3 决策者评估值与群体评估值之差值

输入库所	决策者	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$
$IP_1$	$DM_1$	$\Delta[0.0728, -0.0728]$	$\Delta[0.0307, 0.1820]$	-	-
	$DM_2$	$\Delta[-0.0938, 0.0939]$	$\Delta[0.0307, -0.1513]$	-	-
	$DM_3$	$\Delta[0.0728, -0.0728]$	$\Delta[0.0307, 0.0153]$	-	-
	$DM_4$	$\Delta[-0.0938, 0.0939]$	$\Delta[0.0307, -0.1513]$	-	-
	$DM_5$	$\Delta[0.0728, -0.0728]$	$\Delta[-0.1360, 0.1820]$	-	-
$IP_2$	$DM_1$	$\Delta[0.0697, -0.0363]$	$\Delta[-0.5900, 0.0743]$	$\Delta[-0.3888, -0.1399]$	-
	$DM_2$	$\Delta[0.0697, -0.0363]$	$\Delta[0.0767, -0.0923]$	$\Delta[0.1112, 0.0268]$	-
	$DM_3$	$\Delta[0.0697, 0.1304]$	$\Delta[0.0767, -0.0923]$	$\Delta[0.1112, 0.0268]$	-
	$DM_4$	$\Delta[-0.2636, -0.0363]$	$\Delta[0.0767, 0.0743]$	$\Delta[0.1112, 0.0268]$	-
	$DM_5$	$\Delta[0.0697, -0.0363]$	$\Delta[0.2433, 0.0743]$	$\Delta[-0.0555, 0.0268]$	-
$IP_3$	$DM_1$	$\Delta[-0.2912, -0.0598]$	-	-	-
	$DM_2$	$\Delta[0.2088, -0.0598]$	-	-	-
	$DM_3$	$\Delta[0.0421, -0.2265]$	-	-	-
	$DM_4$	$\Delta[0.2088, 0.1069]$	-	-	-
	$DM_5$	$\Delta[-0.2912, 0.2735]$	-	-	-
$IP_4$	$DM_1$	$\Delta[-0.0250, -0.2052]$	$\Delta[-0.4200, 0]$	$\Delta[0.0613, -0.0687]$	$\Delta[-0.0380, 0.4865]$
	$DM_2$	$\Delta[-0.0250, -0.2052]$	$\Delta[0.2467, 0]$	$\Delta[0.0613, 0.0980]$	$\Delta[0.1287, -0.0135]$
	$DM_3$	$\Delta[-0.1917, 0.2948]$	$\Delta[0.2467, 0]$	$\Delta[0.0613, -0.0687]$	$\Delta[-0.0380, -0.1802]$
	$DM_4$	$\Delta[-0.0250, -0.0385]$	$\Delta[-0.4200, 0]$	$\Delta[0.0613, -0.0687]$	$\Delta[-0.0380, -0.0135]$
	$DM_5$	$\Delta[0.3083, 0.1281]$	$\Delta[0.2467, 0]$	$\Delta[-0.2720, 0.0980]$	$\Delta[-0.0380, -0.1802]$
$IP_5$	$DM_1$	$\Delta[0.1357, 0.0380]$	$\Delta[-0.1747, 0.2100]$	-	-
	$DM_2$	$\Delta[-0.0310, -0.1287]$	$\Delta[-0.0080, -0.1233]$	-	-
	$DM_3$	$\Delta[-0.0310, 0.0380]$	$\Delta[-0.0080, -0.1233]$	-	-
	$DM_4$	$\Delta[0.1357, 0.0380]$	$\Delta[0.1586, 0.2100]$	-	-
	$DM_5$	$\Delta[-0.1977, 0.0380]$	$\Delta[-0.0080, -0.1233]$	-	-

(d) 再次计算群体评估矩阵  $\bar{Q}$ , 由式(5)确定群体共识测度  $CM = 0.9309$ , 因  $CM > \xi (\xi = 0.9)$ , 算法停止, 输出修正后群体评估矩阵  $\bar{Q}$ , 如表 4 所示。

表 4 修正后的群体评估信息

输入库所	影响因子			
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$
$IP_1$	$\Delta[0.7605, 0.9061]$	$\Delta[0.6360, 0.7605]$	-	-
$IP_2$	$\Delta[0.2985, 0.3696]$	$\Delta[0.6399, 0.7590]$	$\Delta[0.4425, 0.4732]$	-
$IP_3$	$\Delta[0.2758, 0.5655]$	-	-	-
$IP_4$	$\Delta[0.5307, 0.7337]$	$\Delta[0.4383, 0.6667]$	$\Delta[0.3026, 0.4020]$	$\Delta[0.3713, 0.5268]$
$IP_5$	$\Delta[0.8950, 0.9620]$	$\Delta[0.7015, 0.7284]$	-	-

c) 由式(6)(7)计算区间二元语义熵  $E_j$ , 再依据式(8)和(9)确定输入库所  $IP_i$  影响因子  $IF_j$  的标准化权重  $\rho_{ij}$ , 如表 5 所示。

表 5 输入库所影响因子权重

输入库所	影响因子			
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$
$IP_1$	0.5312	0.4688	-	-
$IP_2$	0.3129	0.3708	0.3163	-
$IP_3$	1	-	-	-
$IP_4$	0.2678	0.2550	0.2364	0.2408
$IP_5$	0.5508	0.4492	-	-

d) 根据定理 3, 以输入库所  $IP_1$  的影响因子交互作用系数取值范围为例,  $T_{12} = \min\{1.0624, 0.9376\} = 0.9376$ , 评估团队

表 2 群体评估信息

输入库所	影响因子			
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$
$IP_1$	$\Delta[0.761, 0.906]$	$\Delta[0.636, 0.818]$	-	-
$IP_2$	$\Delta[0.264, 0.370]$	$\Delta[0.59, 0.759]$	$\Delta[0.389, 0.473]$	-
$IP_3$	$\Delta[0.291, 0.560]$	-	-	-
$IP_4$	$\Delta[0.525, 0.705]$	$\Delta[0.420, 0.667]$	$\Delta[0.272, 0.402]$	$\Delta[0.371, 0.514]$
$IP_5$	$\Delta[0.864, 0.962]$	$\Delta[0.675, 0.790]$	-	-

确定其影响因子之间存在互补关系, 因此,  $I(f_1, f_2) \in [0.3125, 0.9376]$ , 评估团队确定的其余交互作用系数取值范围如表 6 所示。

表 6 影响因子间交互作用系数取值范围

影响因子	$T_{ij}$	关系	$\bar{T}_{ij}$
$IP_1(f_1, f_2)$	0.9376	互补	$[0.3125, 0.9376]$
$IP_2(f_1, f_2)$	0.3129	互补	$[0.1043, 0.3129]$
$IP_2(f_1, f_3)$	0.3129	冗余	$[-0.3129, -0.1043]$
$IP_2(f_2, f_3)$	0.3163	冗余	$[-0.3163, -0.1054]$
$IP_4(f_1, f_2)$	0.1700	互补	$[0.0567, 0.1700]$
$IP_4(f_1, f_3)$	0.1576	互补	$[0.0525, 0.1576]$
$IP_4(f_1, f_4)$	0.1605	冗余	$[-0.1605, -0.0535]$
$IP_4(f_2, f_3)$	0.1576	独立	$[-0.0525, 0.0525]$
$IP_4(f_2, f_4)$	0.1605	互补	$[0.0535, 0.1605]$
$IP_4(f_3, f_4)$	0.1576	互补	$[0.0525, 0.1576]$
$IP_5(f_1, f_2)$	0.8984	互补	$[0.2995, 0.8984]$

e) 构建并求解极大熵模型, 获取交互作用系数值, 进而确定默比乌斯值  $m$  和模糊测度值  $\mu$ 。以求解输入库所  $IP_2$  的影响因子间的交互作用系数、默比乌斯值和模糊测度值为例, 根据式(18)构建如下极大熵模型:

$$\max z = \sum_{j=1}^3 \sum_{s \in F \setminus V_j} \frac{(3 - |S| - 1)! |S|!}{3!} \times g[I(f_j) - \frac{1}{2}(\sum_{f_i \in F \setminus S} I(f_i, f_j) - \sum_{f_i \in S} I(f_i, f_j))]$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} I(f_1) = 0.3129 \\ I(f_2) = 0.3780 \\ I(f_3) = 0.3163 \\ 0.1043 \leq I(f_1, f_2) \leq 0.3129 \\ -0.3129 \leq I(f_1, f_3) \leq -0.1043 \\ -0.3163 \leq I(f_2, f_3) \leq -0.1054 \end{cases}$$

求解此模型,得到交互作用系数  $I(f_1, f_2) = 0.1043$ ,  $I(f_1, f_3) = -0.1043$  和  $I(f_2, f_3) = -0.1054$ 。由式(18)可得其默比乌斯值为  $m(f_1) = 0.3129$ ,  $m(f_2) = 0.3714$ ,  $m(f_3) = 0.4211$ ,  $m(f_1, f_2) = 0.1043$ ,  $m(f_1, f_3) = -0.1043$ ,  $m(f_2, f_3) = -0.1054$  和  $m(f_1, f_2, f_3) = 0$ 。计算其模糊测度为  $\mu(f_1) = 0.3129$ ,

$\mu(f_2) = 0.3714$ ,  $\mu(f_3) = 0.4211$ ,  $\mu(f_1, f_2) = 0.7886$ ,  $\mu(f_1, f_3) = 0.6297$ ,  $\mu(f_2, f_3) = 0.6871$  和  $\mu(f_1, f_2, f_3) = 1$ 。其余输入库所

表7 影响因子交互作用系数值

影响因子	$I(f_i, f_j)$	影响因子	$I(f_i, f_j)$
$IP_1(f_1, f_2)$	0.3125	$IP_4(f_1, f_4)$	-0.0535
$IP_2(f_1, f_2)$	0.1043	$IP_4(f_2, f_3)$	0
$IP_2(f_1, f_3)$	-0.1043	$IP_4(f_2, f_4)$	0.0536
$IP_2(f_2, f_3)$	-0.1054	$IP_4(f_3, f_4)$	0.0526
$IP_4(f_1, f_2)$	0.0568	$IP_5(f_1, f_2)$	0.2995
$IP_4(f_1, f_3)$	0.0526	-	-

表8 影响因子间的莫比乌斯值和模糊测度值

影响因子	$m$	$\mu$	影响因子	$m$	$\mu$	影响因子	$m$	$\mu$
$IP_1(f_1)$	0.3750	0.3750	$IP_4(f_1)$	0.2399	0.2399	$IP_4(f_1, f_2, f_3)$	0	0.7329
$IP_1(f_2)$	0.3125	0.3125	$IP_4(f_2)$	0.1998	0.1998	$IP_4(f_1, f_2, f_4)$	0	0.7111
$IP_1(f_1, f_2)$	0.3125	1	$IP_4(f_3)$	0.1838	0.1838	$IP_4(f_1, f_3, f_4)$	0	0.6941
$IP_2(f_1)$	0.3129	0.3129	$IP_4(f_4)$	0.2145	0.2145	$IP_4(f_2, f_3, f_4)$	0	0.7043
$IP_2(f_2)$	0.3714	0.3714	$IP_4(f_1, f_2)$	0.0568	0.4965	$IP_4(f_1, f_2, f_3, f_4)$	0	1
$IP_2(f_3)$	0.4211	0.4211	$IP_4(f_1, f_3)$	0.0525	0.4763	$IP_5(f_1)$	0.4010	0.4010
$IP_2(f_1, f_2)$	0.1043	0.7886	$IP_4(f_1, f_4)$	-0.0535	0.4009	$IP_5(f_2)$	0.2995	0.2995
$IP_2(f_1, f_3)$	-0.1043	0.6297	$IP_4(f_2, f_3)$	0	0.3836	$IP_5(f_1, f_2)$	0.2995	1
$IP_2(f_2, f_3)$	-0.1054	0.6871	$IP_4(f_2, f_4)$	0.0536	0.4679	-	-	-
$IP_2(f_1, f_2, f_3)$	0	1	$IP_4(f_3, f_4)$	0.0526	0.4509	-	-	-

f) 根据修正后的群体评估矩阵  $\tilde{Q}^c = (\tilde{q}_{ij}^c)$ , 基于 ITCA 算子集结群体评估值以得到  $IP_i$  的可信度值。以输入库所  $IP_2$  可信度的计算为例: 根据二元语义得分函数<sup>[14]</sup>计算各影响因子下评估值的得分函数值为  $S(q_{21}) = 0.3340$ ,  $S(q_{22}) = 0.6995$  和  $S(q_{23}) = 0.4578$ , 可得  $q_{22} > q_{23} > q_{21}$ , 进而可知  $\sigma(1) = 2$ ,  $\sigma(2) = 3$  和  $\sigma(3) = 1$ , 因此  $H_{\sigma(1)} = \{f_2\}$ ,  $H_{\sigma(2)} = \{f_2, f_3\}$  和  $H_{\sigma(3)} = \{f_1, f_2, f_3\}$ 。由 ITCA 算子可知  $IP_2$  的可信度为  $q_2 = [(s_3, -0.0292), (s_3, 0.0469)]$ 。再由  $\alpha(IP_2) = (\Delta^{-1}(\rho_2, \delta_2) + \Delta^{-1}(\varphi_2, \kappa_2))/2$  计算  $IP_2$  的可信度值  $\alpha(IP_2) = 0.5089$ 。输入库所可信度如表9所示。

表9 输入库所可信度

输入库所	区间值可信度	区间二元语义可信度	$\alpha(IP_i)$
$IP_1$	$\Delta[0.6827, 0.8151]$	$[(s_4, 0.0160), (s_5, -0.0182)]$	0.7489
$IP_2$	$\Delta[0.4708, 0.5469]$	$[(s_3, -0.0292), (s_3, 0.0469)]$	0.5089
$IP_3$	$\Delta[0.2758, 0.5655]$	$[(s_2, -0.0575), (s_3, 0.0655)]$	0.4206
$IP_4$	$\Delta[0.4069, 0.5763]$	$[(s_2, 0.0736), (s_3, 0.0763)]$	0.4916
$IP_5$	$\Delta[0.7791, 0.8221]$	$[(s_5, -0.0542), (s_5, -0.0113)]$	0.8006

在评估团队决策者给出初始评估信息条件下, 不考虑共识达成过程和影响因子之间的关联关系, 将文献[12]利用 ITWA 算子集结决策者评估信息、ITWG 算子集结群体评估信息与文献[7]采用改进动态自适应模糊 Petri 网方法得到的输入库所可信度进行对比。三种方法获取的输入库所可信度及求解结果如表10和图2所示。由表10和图2可知, 本文方法与文献[12]求得的  $IP_3$ 、 $IP_4$  和  $IP_5$  的可信度值比较接近, 而与  $IP_1$  和  $IP_2$  的可信度相对差异较大; 与文献[7]求得的  $IP_1$ 、 $IP_3$  和  $IP_5$  的可信度值较接近, 而与  $IP_2$  和  $IP_4$  可信度的偏差相对较大。其差异的主要原因在于: 本文方法通过自适应修正评估信息提高了群体决策共识度, 决策者在群体决策中更易达成一致共识; 同时考虑影响因子间的互补、独立和冗余关系对评估结果的影响, 影响因子间存在互补关联时, 利用 ITWG 算子可能低估了集结评估信息, 而影响因子间存在冗余关联时, 利用 ITWG 算子可能高估了集结评估信息。而文献[7]确定输入库所可信度的改

进动态自适应模糊 Petri 网方法可能会造成评估信息的损失。因此, 基于共识测度与影响因子关联的方法确定输入库所可信度与文献[7, 12]的结果存在一定的差异。与文献[7, 12]相比, 本文考虑了决策者与群体间的共识达成过程和影响因子间的关联关系, 所获取的结果更加合理有效且可接受程度更高。

表10 三种方法确定的输入库所可信度

输入库所	$IP_1$	$IP_2$	$IP_3$	$IP_4$	$IP_5$
本文	0.7489	0.5089	0.4206	0.4916	0.8006
文献[7]	0.7390	0.4540	0.4270	0.4270	0.8130
文献[12]	0.7780	0.4510	0.4250	0.4810	0.8180

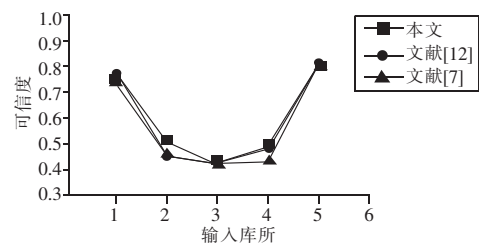


图2 三种方法求解结果对比

## 4 结束语

本文研究了如何确定模糊 Petri 网输入库所可信度的问题, 提出了基于群体共识测度和 Choquet 积分的模糊 Petri 网输入库所可信度确定方法。此方法与文献[12]相比具有如下优势: a) 基于自适应共识测度修正法获取群体评估信息, 进而得到的群体决策结果更容易被各决策者所接纳; b) 考虑了影响因子间存在的互补、独立和冗余关联关系对确定输入库所可信度的影响, 所确定的结果更加符合客观实际。虽然在评估过程中考虑了专家共识测度和影响因子间的互补、独立和冗余关联关系, 但却没有考虑专家评价的置信度以及专家间存在的关联关系, 随后将对此展开研究。此外, 本文方法不但可用于确定模糊 Petri 网输入库所可信度, 还可用于绿色供应商选择、公共交通服务质量评价以及多属性群决策理论应用的其他领域。



## 参考文献:

- [1] Looney C G. Fuzzy Petri nets for rule-based decision making[J]. *IEEE Trans on Systems Man & Cybernetics*, 1988, 18(1): 178-183.
  - [2] Cho J H. Tradeoffs between trust and survivability for mission effectiveness in tactical networks[J]. *IEEE Trans on Cybernetics*, 2015, 45(4): 754-766.
  - [3] Liu Bo, Huang Keman, Li Jianqiang, *et al.* An incremental and distributed inference method for large-scale ontologies based on MapReduce paradigm[J]. *IEEE Trans on Cybernetics*, 2015, 45(1): 53-64.
  - [4] Kang Yongbin, Krishnaswamy S, Zaslavsky A. A retrieval strategy for case-based reasoning using similarity and association knowledge[J]. *IEEE Trans on Cybernetics*, 2014, 44(4): 473-487.
  - [5] Liu Huchen, Lin Qinglian, Mao Lingxiang, *et al.* Dynamic adaptive fuzzy Petri nets for knowledge representation and reasoning[J]. *IEEE Trans on Systems Man & Cybernetics*, 2013, 43(6): 1399-1410.
  - [6] Hu Hesuan, Li Zhiwu, Al-Ahmari A. Reversed fuzzy Petri nets and their application for fault diagnosis[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2011, 60(4): 505-510.
  - [7] Liu Huchen, Lin Qinglian, Ren Minglu. Fault diagnosis and cause analysis using fuzzy evidential reasoning approach and dynamic adaptive fuzzy Petri nets[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, 66(4): 899-908.
  - [8] Qiao Fei, Wu Qidi, Li Li, *et al.* A fuzzy Petri net-based reasoning method for rescheduling[J]. *Transactions of the Institute of Measurement & Control*, 2011, 31(5): 435-455.
  - [9] Gniewek L. Sequential control algorithm in the form of fuzzy interpreted Petri net[J]. *IEEE Trans on Systems Man & Cybernetics*, 2013, 43(2): 451-459.
  - [10] Hamed R I. Esophageal cancer prediction based on qualitative features using adaptive fuzzy reasoning method[J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2015, 27(2): 129-139.
  - [11] Gao Meimei, Zhou Mengchu, Huang Xiaoguang, *et al.* Fuzzy reasoning Petri nets[J]. *IEEE Trans on Systems Man & Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2003, 33(3): 314-324.
  - [12] Liu Huchen, You Jianxin, Tian Guangdong. Determining truth degrees of input places in fuzzy Petri nets[J]. *IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(12): 3425-3431.
  - [13] Chen S M, Ke J S, Chang Jinfu. Knowledge representation using fuzzy Petri nets[J]. *IEEE Trans on Knowledge & Data Engineering*, 1990, 2(3): 311-319.
  - [14] Zhang Huimin. The multi-attribute group decision making method based on aggregation operators with interval-valued 2-tuple linguistic information[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2012, 56(1-2): 27-35.
  - [15] Wang Jianqiang, Wang Dandan, Zhang Hongyu, *et al.* Multi-criteria group decision making method based on interval 2-tuple linguistic information and Choquet integral aggregation operators[J]. *Soft Computing*, 2015, 19(2): 389-405.
  - [16] Palomares I, Estrella F J, Martinez L, *et al.* Consensus under a fuzzy context: taxonomy analysis framework AFRYCA and experimental case of study[J]. *Information Fusion*, 2014, 20(15): 252-271.
  - [17] 张世涛, 朱建军, 刘小弟. 基于重要度引导偏好识别修正的多粒度语言共识模型[J]. *控制与决策*, 2015, 30(9): 1609-1616.
  - [18] Zhang Bowen, Dong Yucheng, Xu Yinfeng. Multiple attribute consensus rules with minimum adjustments to support consensus reaching[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2014, 67(9): 35-48.
  - [19] Dong Yucheng, Zhang Hengjie, Herrera-Viedma E. Consensus reaching model in the complex and dynamic MAGDM problem[J]. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 106(8): 206-219.
  - [20] Lotfi F H, Fallahnejad R. Imprecise Shannon's entropy and multi attribute decision making[J]. *Entropy*, 2010, 12(1): 53-62.
  - [21] Singh A, Gupta A, Mehra A. Energy planning problems with interval-valued 2-tuple linguistic information[J]. *Operational Research*, 2017, 17(3): 821-848.
  - [22] Onisawa T, Sugeno M, Nishiwaki Y, *et al.* Fuzzy measure analysis of public attitude towards the use of nuclear energy[J]. *Fuzzy Set & Systems*, 1986, 20(3): 259-289.
  - [23] Marichal J L. An axiomatic approach of the discrete Choquet integral as a tool to aggregate interacting criteria[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2000, 8(6): 800-807.
  - [24] Grabisch M. k-order additive discrete fuzzy measures and their representation[J]. *Fuzzy Sets & Systems: Special Issue on Fuzzy Measures and Integrals*, 1997, 92(2): 167-189.
  - [25] 武建章, 张强. 基于最大熵原则的 2-可加模糊测度确定方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(11): 2346-2351.
  - [26] Marichal J L. Entropy of discrete Choquet capacities[J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 137(3): 612-624.
- 
- (上接第 1690 页)
- [5] Krishnan H, Kapuscinski R, Butz D A. Coordinating contracts for decentralized supply chains with retailer promotional effort[J]. *Management Science*, 2004, 50(1): 48-63.
  - [6] 侯玉梅, 田歆, 马利军, 等. 基于供应商促销与销售努力的供应链协同决策[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(12): 3087-3094.
  - [7] 徐最, 朱道立, 朱文贵. 销售努力水平影响需求情况下的供应链回购契约[J]. *系统工程理论与实践*, 2008, 28(4): 1-11.
  - [8] 马利军, 薛巍立, 王汝现. 零售商销售努力竞争时的供应链协调[J]. *系统管理学报*, 2013, 22(6): 808-813.
  - [9] He Xiuli, Krishnamoorthy A, Prasad A, *et al.* Retail competition and cooperative advertising[J]. *Operations Research Letters*, 2011, 39(1): 11-16.
  - [10] 何勇, 杨德礼, 吴清烈. 基于努力因素的供应链利益共享契约模型研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2006, 12(11): 1865-1868.
  - [11] 曲道钢, 郭亚军. 需求与销售努力相关下混合渠道供应链协调研究[J]. *运筹与管理*, 2010, 19(4): 8-13.
  - [12] 鹿庆华, 蒋晖, 侯岳铭, 等. 需求受努力因素影响的供应链收益共享契约模型[J]. *系统管理学报*, 2013, 22(3): 371-378.
  - [13] 刘鹏飞. 需求依赖零售商努力水平的 VMI 协调[J]. *系统工程学报*, 2012, 27(5): 679-684.
  - [14] 冯花平, 黄俊莲, 李光杰. 基于促销投资的供应链应急协调研究[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(4): 1249-1252.
  - [15] Pang Qinghua, Hou Yanli, Lyu Yifei. Coordinating three-level supply chain under disruptions using revenue-sharing contract with effort dependent demand[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 2016(7): 1-10.
  - [16] 代建生, 谢梦萍. 销售努力下基于 CVaR 的二次订货模型[J]. *软科学*, 2016, 30(8): 139-144.
  - [17] Lau H S, Lau H L. Manufacturer's pricing strategy and return policy for a single-period commodity[J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 116(2): 291-304.