

基于关联群广义直觉模糊软集的仿真可信度指标聚合方法

李 晟^{1,2†}, 彭小奇³, 彭 涛¹

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 江西理工大学 理学院, 江西 赣州 341000; 3. 湖南第一师范学院 信息科学与工程学院, 长沙 410205)

摘 要: 针对仿真可信度主观评估过程存在关联关系时基于独立假设的指标聚合算子失效的问题, 以及主观评估时评估专家的判断主观性强且表述能力不足的问题, 提出一种基于关联群广义直觉模糊软集的仿真可信度指标聚合方法以及群广义直觉模糊软集关联加权平均聚合算子. 结合直觉模糊 TOPSIS 方法, 给出了方法的具体步骤. 通过 CRH2 型高速列车组牵引传动故障注入仿真可信度主观评估实例, 验证了所提出方法的可行性和有效性.

关键词: 仿真可信度; 群广义直觉模糊软集; 关联聚合算子; 可信度指标聚合; CRH2 型高速列车组; 故障注入仿真

中图分类号: N945.16

文献标志码: A

Aggregation method for simulation credibility index based on group generalized intuitionistic fuzzy soft sets with correlations

LI Sheng^{1,2†}, PENG Xiao-qi³, PENG Tao¹

(1. School of Information Science and Technology, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Science, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 3. School of Information Science and Engineering, Hu'nan First Normal University, Changsha 410205, China)

Abstract: Aiming at the problems that correlations are widespread during the simulation system credibility evaluation process, which makes the aggregation operators under independent assumption failure and in the simulation credibility subject evaluation process, the expert judgment subjectivity is strong and its language performance ability is insufficient. Therefore, the group general intuitionistic fuzzy soft set correlated weight aggregation(G-GIFSSCWA) operator is defined. Then an aggregation method for the simulation system credibility indicators based on the G-GIFSS with correlations is developed, and a practical example about the China type CRH2 high-speed train fault injection simulation system is given to illustrate the flexibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: simulation credibility; G-GIFSS; correlated aggregation operator; credibility index aggregation; type CRH2 high-speed train; fault injection simulation

0 引 言

仿真可信度的主观评估, 是通过评估专家的主观评判给出他们对仿真系统使用者在一定环境和条件下, 使用仿真系统得到的仿真结果的正确性的信心程度, 是衡量仿真系统性能的关键指标^[1], 而仿真可信度指标的聚合方法则是仿真可信度评估的关键^[2-3]. 但随着仿真系统日益复杂, 仿真可信度指标聚合过程中单方面或人为的偏好可能影响判断的准确性, 造成决策失误; 传统的基于精确数的评估方法因表述能力不足, 也常导致评估结果失真. 因此, 基于群

组评价和模糊判断的指标聚合方法逐渐成为各类主观评估的研究热点^[4-6]. 其中, 直觉模糊集因具有更强的对模糊信息的表达能力, 在考虑主观因素方面更加细腻, 而被广泛应用于模式识别、医疗诊断、军事等领域. 直觉模糊软集理论作为 Maji 等^[7-8] 将直觉模糊集和软集相结合提出的一种多属性决策 (MADM) 方法, 获得了广泛的应用. Agarwal 等^[9] 提出了广义直觉模糊软集 (GIFSS) 的概念, 在应用直觉模糊集对信息进行描述的基础上, 引入一个表示仲裁者对决策者所提供信息的有效性进行评估后给出的广义参

收稿日期: 2016-09-28; 修回日期: 2016-12-28.

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (61490702); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目 (61321003).

作者简介: 李晟 (1982—), 男, 讲师, 博士生, 从事系统可靠性评估、仿真可信度评估的研究; 彭小奇 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事故障检测、复杂工业过程决策与控制等研究.

†通讯作者. E-mail: lsjxust@gmail.com

量,并将其成功应用于医疗诊断问题. 武华等^[10]提出了群广义直觉模糊软集概念 (G-GIFSS), 引入仲裁者群组对决策者所提供信息的有效性进行评估后给出的广义参量集, 并定义了一种 G-GIFSS 聚合算子, 构建该聚合算子的多属性聚合模型, 用于解决目标威胁的评估问题, 取得了很好的效果. G-GIFSS 理论结合了群组评价和模糊判断的优点, 可以很好地克服人为偏好的不利影响, 具有更强的表达能力, 将其应用于仿真可信度主观评估过程有其明显的优势, 但目前此类研究还未见报道. 另外, 当前基于 G-GIFSS 的属性或指标的聚合方法均基于独立性假设, 即认为属性 (指标) 间以及决策者的偏好间相互独立, 这与实际情况不完全相符.

因为在直觉模糊信息下建立可信度指标体系一般要满足完备性、代表性和独立性条件, 而在实际的群组评价问题中很难找到一组既独立又能全面概括的可信度指标, 因此需要放松对可信度指标独立性的要求, 并且实际问题的可信度指标通常并不严格独立而存在相互关联^[11]. 此外, 在进行群组评估时, 评估专家的偏好和仲裁者的判断会受其地位、威望、知识结构、期望等诸多因素的影响, 使评估专家间和仲裁者间存在关联关系^[12]. 若仍采用基于独立假设的方法进行聚合, 则可能高估或低估最终的评价值, 导致评价结果失真.

为此, 本文提出一种基于关联假设和 G-GIFSS 理论的仿真可信度指标聚合方法. 在 Xu^[13] 提出的直觉模糊集关联加权平均聚合算子 (IFCA) 基础上, 提出群广义直觉模糊软集关联加权平均聚合算子 (G-GIFSSCWA), 并证明了该算子的若干性质. 结合直觉模糊 TOPSIS 方法 (IFTOPSIS)^[14], 给出了方法的具体步骤, 并以 CRH2 型列车组牵引传动故障注入仿真可信度评估为例, 验证了方法的合理性和有效性.

1 预备知识

1.1 直觉模糊集的基本概念

定义 1^[15] 设论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 为一非空有限集合, $t_A(x_i)$ 和 $f_A(x_i)$ 分别表示论域 X 中元素 x_i 属于 A 的隶属度和非隶属度, 则集合 $A = \{(x_i, t_A(x_i), f_A(x_i)) | x_i \in X\}$ 称为直觉模糊集. 其中 $t_A(x_i) : X \rightarrow [0, 1], f_A(x_i) : X \rightarrow [0, 1]$, 且 $0 \leq t_A(x_i) + f_A(x_i) \leq 1, \forall x_i \in X$. 另外, 用 $\pi_A(x_i) = 1 - t_A(x_i) - f_A(x_i)$ 表示论域 X 中元素 x_i 属于 A 的犹豫度.

定义 2^[15] 设论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 为一非空有限集合, $\alpha(x_i) = (t_\alpha(x_i), f_\alpha(x_i))$ 和 $\alpha(x_j) = (t_\alpha(x_j), f_\alpha(x_j)) (x_i, x_j \in X, i, j = 1, 2, \dots, m)$ 分别为两个直觉模糊数, 则直觉模糊可信度的运算法则定义如下:

$$\alpha(x_i) \oplus \alpha(x_j) = (t_\alpha(x_i) + t_\alpha(x_j) - t_\alpha(x_i)t_\alpha(x_j), f_\alpha(x_i)f_\alpha(x_j)); \quad (1)$$

$$\alpha(x_i) \otimes \alpha(x_j) = (t_\alpha(x_i)t_\alpha(x_j), f_\alpha(x_i) + f_\alpha(x_j) - f_\alpha(x_i)f_\alpha(x_j)); \quad (2)$$

$$\lambda\alpha(x_i) = (1 - (1 - t_\alpha(x_i))^\lambda, (f_\alpha(x_i))^\lambda), \lambda > 0; \quad (3)$$

$$(\alpha(x_i))^\lambda = ((t_\alpha(x_i))^\lambda, 1 - (1 - f_\alpha(x_i))^\lambda), \lambda > 0. \quad (4)$$

定义 3^[15] 设 $\alpha = (t_\alpha, f_\alpha)$ 为任一直觉模糊数, 则其得分函数和精确函数分别定义为

$$\Delta_\alpha = t_\alpha^2 - f_\alpha^2, \quad (5)$$

$$H_\alpha = t_\alpha^2 + f_\alpha^2. \quad (6)$$

定义 4^[15] 若 α_1 和 α_2 是两个直觉模糊数, 则直觉模糊数的排序规则定义为: 1) 若 $\Delta_{\alpha_1} < \Delta_{\alpha_2}$, 则 $\alpha_1 < \alpha_2$. 2) 若 $\Delta_{\alpha_1} = \Delta_{\alpha_2}$, 则 i) 当 $H_{\alpha_1} = H_{\alpha_2}$ 时, $\alpha_1 = \alpha_2$; ii) 当 $H_{\alpha_1} < H_{\alpha_2}$ 时, $\alpha_1 < \alpha_2$; iii) 当 $H_{\alpha_1} > H_{\alpha_2}$ 时, $\alpha_1 > \alpha_2$.

1.2 直觉模糊集聚合算子 IFWA 和 IFCA

定义 5^[16] 设论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 为一非空有限集合, $\alpha(x_i) = (t_\alpha(x_i), f_\alpha(x_i)) (i = 1, 2, \dots, m)$ 为一组直觉模糊数, $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^\top$ 为直觉模糊数 $\alpha(x_i)$ 的权向量, 且 $\omega_i \in [0, 1], \sum_{i=1}^m \omega_i = 1$, 则定义直觉模糊加权平均聚合算子 (IFWA) 的表达式为

$$\begin{aligned} \text{IFWA}(\alpha(x_1), \alpha(x_2), \dots, \alpha(x_m)) = \\ \sum_{i=1}^m \oplus \omega_i \alpha(x_i) = \\ \left[1 - \prod_{i=1}^m (1 - t_\alpha(x_i))^{\omega_i}, 1 - \prod_{i=1}^m (f_\alpha(x_i))^{\omega_i} \right]. \quad (7) \end{aligned}$$

由于 IFWA 算子是基于独立假设条件的, 不适用于关联假设条件. Sugeno 提出, 在关联假设条件下, 可使用定义 6 给出的模糊测度来表示属性间的关联关系^[17].

定义 6^[17] 设 $P(X)$ 为有限集合 X 的幂集, 若集函数 $\mu : P(X) \rightarrow [0, 1]$ 满足如下条件: 1) $\mu(\emptyset) = 0, \mu(X) = 1$; 2) $E \in P(X), F \in P(X), E \subseteq F \subseteq X, \mu(E) \leq \mu(F) \leq \mu(X)$. 则称 μ 为定义在 $P(X)$ 上的模糊测度.

对 $\forall B \in P(X), \mu(B)$ 表示集合 B 的权重或重要程度. 设 $\forall E, F \in P(X)$ 且 $E \cap F = \emptyset$, 若 $\mu(E \cup F) > \mu(E) + \mu(F)$, 则两组属性 E, F 组合在一起的贡献大于其单独贡献值之和, 即属性间是互补关系; 若 $\mu(E \cup F) < \mu(E) + \mu(F)$, 则两组属性 E, F 组合在一起的贡献小于其单独贡献值之和, 即属性间是冗余

关系;若 $\mu(E \cup F) = \mu(E) + \mu(F)$, 则两组属性 E, F 组合在一起的贡献等于其单独贡献之和, 即属性间相互独立. 可见, 模糊测度可以很好地表现不同属性间的关联关系. Xu^[13] 利用模糊测度表示属性的关联权重, 并结合 Choquet 模糊积分^[18], 给出了基于关联假设的直觉模糊关联加权平均聚合算子 (IFCA).

定义 7^[13] 设 μ 为定义在 $P(X)$ 上的模糊测度, 且 $\alpha(x_i) = (t_\alpha(x_i), f_\alpha(x_i)) (i = 1, 2, \dots, m)$ 为一组直觉模糊数. $\forall B \subset X$, 直觉模糊数关联平均算子 IFCA 的表达式为

$$(C_1) \int \alpha d\mu = \text{IFCA}(\alpha(x_1), \alpha(x_2), \dots, \alpha(x_m)) = \sum_{i=1}^m \oplus [(\mu(B_{\sigma(i)}) - \mu(B_{\sigma(i-1)}))\alpha(x_{\sigma(i)})]. \quad (8)$$

$(C_1) \int \alpha d\mu$ 表示 Choquet 模糊积分, $(\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(m))$ 是 $(1, 2, \dots, m)$ 的任意置换, 使得对于任意 i 有 $\alpha(x_{\sigma(1)}) \geq \alpha(x_{\sigma(2)}) \geq \dots \geq \alpha(x_{\sigma(m)})$ (排序规则见定义 4), $B_{\sigma(i)} = \{x_{\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \dots, x_{\sigma(i)}\}$ 且 $B_{\sigma(0)} = \emptyset$. 对于直觉模糊数, $\forall B \subset X$, IFCA 可以转化为如下形式:

$$\text{IFCA}(\alpha(x_1), \alpha(x_2), \dots, \alpha(x_m)) = \left(1 - \prod_{i=1}^m (1 - t_\alpha(x_{\sigma(i)}))^{\mu(B_{\sigma(i)}) - \mu(B_{\sigma(i-1)})}, \prod_{i=1}^m (f_\alpha(x_{\sigma(i)}))^{\mu(B_{\sigma(i)}) - \mu(B_{\sigma(i-1)})}\right). \quad (9)$$

运算后的结果仍为一个直觉模糊数.

1.3 群广义直觉模糊软集的概念

定义 8^[10] 设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 为一个可信度指标全集, IF^X 表示 X 上所有直觉模糊子集所构成的集合, E 为评估专家全集, 令 $A \subseteq E$, 若存在映射 $P: A \rightarrow \text{IF}^X$, 则称序对 (P, A) 为集合 X 上的一个直觉模糊软集.

群广义直觉模糊软集是在直觉模糊软集中加入多位仲裁者提供的广义参量集, 表示多位仲裁者对评估专家所给出的直觉模糊集的有效性或可靠性进行再次评估, 以修正直觉模糊软集在问题描述时不够准确的问题. 群广义直觉模糊软集的定义如下.

定义 9^[10] 设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 为一个可信度指标全集, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 为一个评估专家全集, 则称序对 (X, E) 为软集. 令 $A \subseteq E$, 若存在映射 $Q: A \rightarrow \text{IF}^X$, IF^X 表示 X 上所有直觉模糊子集的集合, 且广义参量集 $G = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_l\}$ 为 E 的所有直觉模糊子集的集合, 其权重集合为 $\omega_\delta = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_l\}, 0 \leq \omega_k \leq 1, \sum_{k=1}^l \omega_k = 1, k = 1, 2, \dots, l$. 则

Q_G 为基于软集 (X, E) 的群广义直觉模糊软集, 其表达式为

$$Q_G = (Q(e), G(e)) = (Q(e), \{\delta_1(e)|_{\omega_1}, \delta_2(e)|_{\omega_2}, \dots, \delta_l(e)|_{\omega_l}\}); \quad (10)$$

s.t. $Q(e) \in \text{IF}^X, G(e) \in \text{IF}$.

其中: 映射 $Q_G: A \rightarrow \text{IF}^X \times \text{IF}$, $Q(e)$ 为直觉模糊软集中参数对元素的隶属度, $G(e) = \{\delta_1(e)|_{\omega_1}, \delta_2(e)|_{\omega_2}, \dots, \delta_l(e)|_{\omega_l}\}$ 为 $Q(e)$ 中 X 元素隶属度的有效性程度.

1.4 基于独立假设的群广义直觉模糊软集聚合算子

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 为一个可信度指标全集, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 为一个评估专家全集, $D = \{d_1, d_2, \dots, d_l\}$ 为一个仲裁者全集, 用 $Q_G(e_j) = (Q(e_j), G(e_j)) (j = 1, 2, \dots, n)$ 表示一个群广义直觉模糊软集, 其中 $Q(e_j) = \{\alpha_1(e_j), \alpha_2(e_j), \dots, \alpha_m(e_j)\}$, $G(e_j) = \{\delta_1(e_j), \delta_2(e_j), \dots, \delta_l(e_j)\}$. $\alpha_i(e_j) = (t_{\alpha_i}(e_j), f_{\alpha_i}(e_j)), \delta_k(e_j) = (t_{\delta_k}(e_j), f_{\delta_k}(e_j))$ 为直觉模糊数, $\alpha_i(e_j)$ 表示评估专家 e_j 给出的可信度指标 x_i 的可信度, $\delta_k(e_j)$ 表示仲裁者 d_k 给出的评估专家 e_j 判断的有效性程度. 可信度指标和仲裁者的独立权重向量分别用 $\omega(e_j) = \{\omega_1(e_j), \omega_2(e_j), \dots, \omega_m(e_j)\}$ 和 $\omega'(e_j) = \{\omega'_1(e_j), \omega'_2(e_j), \dots, \omega'_l(e_j)\}$ 表示.

定义 10^[10] 当元素间和仲裁者间均相互独立时, 评估专家 e_j 给出的群广义直觉模糊软集的加权平均聚合算子 Z_{Q_j} 的表达式为

$$Z_{Q_j}(\alpha_1(e_j), \alpha_2(e_j), \dots, \alpha_m(e_j)) = \left[1 - \prod_{i=1}^m (1 - t_{\alpha_i}(e_j))^{\omega_i(e_j)} - \prod_{k=1}^l (1 - t_{\delta_k}(e_j))^{\omega'_k(e_j)} + \prod_{i=1}^m (1 - t_{\alpha_i}(e_j))^{\omega_i(e_j)} \prod_{k=1}^l (1 - t_{\delta_k}(e_j))^{\omega'_k(e_j)}, \prod_{k=1}^l (f_{\delta_k}(e_j))^{\omega'_k(e_j)} + \prod_{i=1}^m (f_{\alpha_i}(e_j))^{\omega_i(e_j)} - \prod_{k=1}^l (f_{\delta_k}(e_j))^{\omega'_k(e_j)} \prod_{i=1}^m (f_{\alpha_i}(e_j))^{\omega_i(e_j)}\right], \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, l.$$

其计算结果也是一个直觉模糊数. 但是, 若基于关联假设, 式 (11) 不再适用; 另外, 式 (11) 在基于 G-GIFSS 和群组评估的仿真可信度指标聚合时使用不够方便, 聚合结果仅表示某位评估专家给出的评估结果. 因此, 需要进一步研究基于关联假设和 G-GIFSS 的仿真可信度指标聚合算子.

2 G-GIFSSCWA 聚合算子

本节给出仿真可信度指标聚合算子 G-GIFSSCWA, 用于基于关联假设和 G-GIFSS 的仿真

可信度指标聚合. 设 μ, μ^*, μ' 分别表示定义在 $P(X)$, $P(E)$ 和 $P(D)$ 上的模糊测度, $P(X)$, $P(E)$ 和 $P(D)$ 分别是集合 X, E 和 D 的幂集. 则 G-GIFSSCWA 聚合算子定义如下.

定义 11 当可信度指标间、评估专家间和仲裁者间均存在关联关系时, 定义基于软集 (X, E) 的 G-GIFSSCWA 算子为

$$\begin{aligned} & \text{G-GIFSSCWA}(Z_{CQ_1}, Z_{CQ_2}, \dots, Z_{CQ_n}) = \\ & \sum_{j=1}^n \oplus [(\mu^*(B_{\sigma(j)}) - \mu^*(B_{\sigma(j-1)}))Z_{CQ_{\sigma(j)}}] = \\ & \left(1 - \prod_{j=1}^n (1 - t_{Z_{CQ_j}})^{\mu^*(B_{\sigma(j)}) - \mu^*(B_{\sigma(j-1)})}, \right. \\ & \left. \prod_{j=1}^n (f_{Z_{CQ_j}})^{\mu^*(B_{\sigma(j)}) - \mu^*(B_{\sigma(j-1)})}\right), j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \tag{12}$$

其中

$$\begin{aligned} & Z_{CQ_j} = (t_{Z_{CQ_j}}, f_{Z_{CQ_j}}) = \\ & \text{IFCA}(\alpha_1(e_j), \alpha_2(e_j), \dots, \alpha_m(e_j)) \otimes \\ & \text{IFCA}(\delta_1(e_j), \delta_2(e_j), \dots, \delta_l(e_j)), \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} & t_{Z_{CQ_j}} = \\ & 1 - \prod_{i=1}^m (1 - t_{\alpha_{\sigma(i)}}(e_j))^{\mu(B_{\sigma(i)}) - \mu(B_{\sigma(i-1)})} - \\ & \prod_{k=1}^l (1 - t_{\delta_{\sigma(k)}}(e_j))^{\mu'(B_{\sigma(k)}) - \mu'(B_{\sigma(k-1)})} + \\ & \prod_{i=1}^m (1 - t_{\alpha_{\sigma(i)}}(e_j))^{\mu(B_{\sigma(i)}) - \mu(B_{\sigma(i-1)})}. \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} & f_{Z_{CQ_j}} = \\ & \prod_{i=1}^m (f_{\alpha_{\sigma(i)}}(e_j))^{\mu(B_{\sigma(i)}) - \mu(B_{\sigma(i-1)})} + \\ & \prod_{k=1}^l (f_{\delta_{\sigma(k)}}(e_j))^{\mu'(B_{\sigma(k)}) - \mu'(B_{\sigma(k-1)})} - \\ & \prod_{i=1}^m (f_{\alpha_{\sigma(i)}}(e_j))^{\mu(B_{\sigma(i)}) - \mu(B_{\sigma(i-1)})}. \\ & \prod_{i=1}^l (f_{\delta_{\sigma(k)}}(e_j))^{\mu'(B_{\sigma(k)}) - \mu'(B_{\sigma(k-1)})}, \end{aligned} \tag{15}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, l.$$

$\mu(B_{\sigma(i)}) - \mu(B_{\sigma(i-1)}), \mu^*(B_{\sigma(j)}) - \mu^*(B_{\sigma(j-1)})$ 和 $\mu'(B_{\sigma(k)}) - \mu'(B_{\sigma(k-1)})$ 分别表示可信度指标 x_i 、评估专家 e_j 和仲裁专家 d_k 的关联权重, $(\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(m)), (\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(n))$ 和 $(\sigma(1), \sigma(2), \dots, \sigma(l))$ 分别是 $(1, 2, \dots, m), (1, 2, \dots, n)$ 和 $(1, 2, \dots,$

$l)$ 的任意置换, 分别使得 $\alpha_{\sigma(1)}(e_j) \geq \alpha_{\sigma(2)}(e_j) \geq \dots \geq \alpha_{\sigma(m)}(e_j), Z_{CQ}(e_{\sigma(1)}) \geq Z_{CQ}(e_{\sigma(2)}) \geq \dots \geq Z_{CQ}(e_{\sigma(n)})$ 和 $\delta_{\sigma(1)}(e_j) \geq \delta_{\sigma(2)}(e_j) \geq \dots \geq \delta_{\sigma(l)}(e_j); B_{\sigma(i)} = \{x_{\sigma(1)}, x_{\sigma(2)}, \dots, x_{\sigma(i)}\}, B_{\sigma(j)} = \{e_{\sigma(1)}, e_{\sigma(2)}, \dots, e_{\sigma(j)}\}$ 和 $B_{\sigma(k)} = \{d_{\sigma(1)}, d_{\sigma(2)}, \dots, d_{\sigma(k)}\}$, 且有 $B_{\sigma(0)} = \emptyset$.

式 (12) 的计算结果表示基于专家偏好间存在关联假设下, 将各评估专家给出的仿真可信度进行聚合后得到的仿真全局可信度, 而式 (13) 的计算结果表示基于关联假设时, 评估专家 e_j 给出的仿真可信度.

定理 1 设有一群广义直觉模糊软集 $\{Q_G(e_j) = (Q(e_j), G(e_j)); j = 1, 2, \dots, n\}$, 若评估专家间存在关联, 可信度指标间和仲裁专家间均相互独立, 则有

$$\begin{aligned} & \text{G-GIFSSCWA}(Z_{CQ_1}, Z_{CQ_2}, \dots, Z_{CQ_n}) = \\ & \text{IFCA}(Z_{Q_1}, Z_{Q_2}, \dots, Z_{Q_n}). \end{aligned} \tag{16}$$

证明 因为评估专家间存在关联, 而可信度指标间和仲裁者间均相互独立, 可信度指标集和仲裁者集的权重分别等于其包含评估元素和仲裁者权重之和, 所以有

$$\begin{aligned} & \mu(B_{\sigma(i)}) = \mu(B_{\sigma(i-1)} \cup x_i) = \mu(B_{\sigma(i-1)}) + \mu(x_i), \\ & \mu'(B_{\sigma(k)}) = \mu'(B_{\sigma(k-1)} \cup d_k) = \mu'(B_{\sigma(k-1)}) + \mu'(d_k). \end{aligned}$$

从而有 $\mu(x_i) = \mu(B_{\sigma(i)}) - \mu(B_{\sigma(i-1)}), \mu'(d_k) = \mu'(B_{\sigma(k)}) - \mu'(B_{\sigma(k-1)})$. 故有

$$\begin{aligned} & \mu(X) = \mu(x_{\sigma(1)}) + \mu(x_{\sigma(2)}) + \dots + \mu(x_{\sigma(m)}) = 1, \\ & \text{即 } \sum_{i=1}^m \mu(x_{\sigma(i)}) = 1. \text{ 且有} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \mu'(G) = \mu'(d_{\sigma(1)}) + \mu'(d_{\sigma(2)}) + \dots + \mu'(d_{\sigma(l)}) = 1, \\ & \text{即 } \sum_{k=1}^l \mu'(d_{\sigma(k)}) = 1. \end{aligned}$$

令 $\mu(x_{\sigma(i)}) = \omega_{\sigma(i)}, \mu'(d_{\sigma(k)}) = \omega'_{\sigma(k)}$, 则有

$$\begin{aligned} & Z_{CQ_j} = \\ & \left[1 - \prod_{i=1}^m (1 - t_{\alpha_{\sigma(i)}}(e_j))^{\omega_{\sigma(i)}} - \right. \\ & \prod_{k=1}^l (1 - t_{\delta_{\sigma(k)}}(e_j))^{\omega'_{\sigma(k)}} + \\ & \prod_{i=1}^m (1 - t_{\alpha_{\sigma(i)}}(e_j))^{\omega_{\sigma(i)}} \prod_{k=1}^l (1 - t_{\delta_{\sigma(k)}}(e_j))^{\omega'_{\sigma(k)}}, \\ & \left. \prod_{i=1}^m (f_{\alpha_{\sigma(i)}}(e_j))^{\omega_{\sigma(i)}} + \prod_{k=1}^l (f_{\delta_{\sigma(k)}}(e_j))^{\omega'_{\sigma(k)}} - \right. \\ & \left. \prod_{i=1}^m (f_{\alpha_{\sigma(i)}}(e_j))^{\omega_{\sigma(i)}} \prod_{k=1}^l (f_{\delta_{\sigma(k)}}(e_j))^{\omega'_{\sigma(k)}}\right] = Z_{Q_j}. \end{aligned}$$

代入式 (12), 并参见定义 7, 可以证明式 (16) 成立. \square

定理 1 表明, G-GIFSSCWA 聚合算子是 IFCA 聚合算子在群广义直觉模糊软集中的扩展, 因此 G-GIFSSCWA 聚合算子比 IFCA 聚合算子更具一般性.

定理 2 假设有一个群广义直觉模糊软集 $\{Q_G(e_j) = (Q(e_j), G(e_j)); j = 1, 2, \dots, n\}$, 若评估专家间相互独立, 而可信度指标间和仲裁专家间均存在关联时, 则有

$$G-GIFSSCWA(Z_{CQ_1}, Z_{CQ_2}, \dots, Z_{CQ_n}) = IFWA(Z_{CQ_1}, Z_{CQ_2}, \dots, Z_{CQ_n}). \quad (17)$$

证明 因为评估专家间相互独立, 而可信度指标间和仲裁者间均存在关联, 评估专家集的权重等于其包含的评估专家权重之和, 所以有

$$\mu^*(e_j) = \mu^*(B_{\sigma(j)}) - \mu^*(B_{\sigma(j-1)}).$$

故有

$$\mu^*(E) = \mu^*(e_{\sigma(1)}) + \mu^*(e_{\sigma(2)}) + \dots + \mu^*(e_{\sigma(n)}) = 1,$$

$$\text{即 } \sum_{j=1}^n \mu^*(e_{\sigma(j)}) = 1.$$

令 $\mu^*(e_{\sigma(j)}) = \omega_{\sigma(j)}^*$, 代入式 (12), 并参见定义 5, 有式 (17) 成立. \square

定理 2 表明, G-GIFSSCWA 聚合算子是 IFWA 聚合算子在群广义直觉模糊软集的评估专家间相互独立, 而可信度指标间和仲裁专家间均存在关联条件下的扩展.

定理 3 假设有一个群广义直觉模糊软集 $\{Q_G(e_j) = (Q(e_j), G(e_j)); j = 1, 2, \dots, n\}$, 满足定义 11 且有 $\delta_{\sigma(k)}(e_j) = (0, 1), k = 1, 2, \dots, l$, 则有

$$G-GIFSSCWA(Z_{CQ_1}, Z_{CQ_2}, \dots, Z_{CQ_n}) = (0, 1).$$

证明 将 $\delta_{\sigma(k)}(e_j) = (0, 1)$ 代入式 (18), 容易得到 $Z_{CQ_j} = (0, 1)$, 将 $Z_{CQ_j} = (t_{Z_{CQ_j}}, f_{Z_{CQ_j}}) = (0, 1)$ 代入式 (12), 则有定理 3 成立. \square

定理 3 表明, 当所有仲裁者均认为评估专家给出的可信度指标集的所有评估值完全无效时, 用 G-GIFSSCWA 算子集结所得的评估结果是完全不可信的, 用直觉模糊数表示, 即 $(0, 1)$.

综上所述, 本文提出的 G-GIFSSCWA 聚合算子比文献 [10] 所给出的群广义直觉模糊软集加权平均聚合算子更具一般性, 且更加适用于仿真可信度的评估过程.

3 基于关联群广义直觉模糊软集的仿真可信度指标聚合方法

由定义 6 可知, 需要 2^m 个模糊测度来描述 X 中不同属性之间的相互关系, 即确定模糊测度的计算量随属性的数量呈指数级增长. 为此, Grabisch^[18] 提

出只需确定 $m(m+1)/2$ 个参数的 2-可加模糊测度的概念. 本文基于 G-GIFSSCWA 算子, 采用 2-可加模糊测度来定义关联权重, 结合直觉模糊 TOPSIS 方法, 给出一种如图 1 所示的基于关联群广义直觉模糊软集的仿真可信度指标聚合方法, 其具体步骤如下.

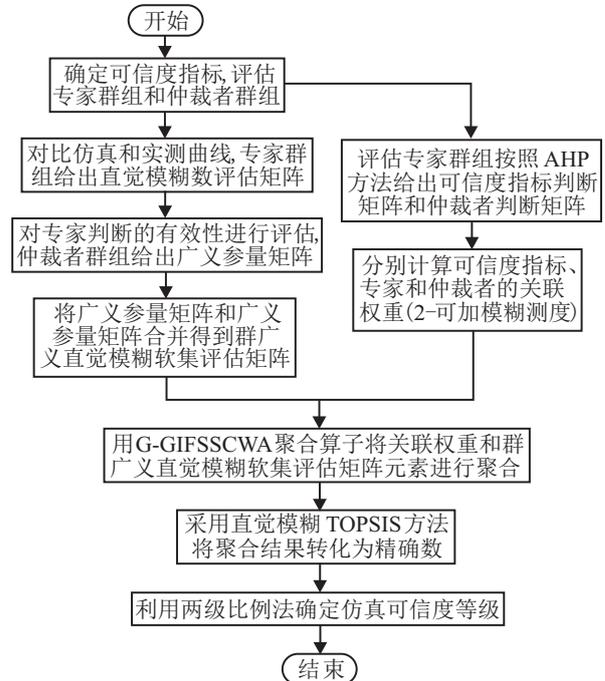


图 1 仿真可信度指标聚合方法流程

Step 1: 根据仿真系统的实际结构和层次, 结合仿真目的和特点, 由仿真系统开发人员、使用者及群组内的评估专家共同论证, 科学确定仿真系统的可信度指标.

Step 2: 由评估专家群组中的每位评估专家 e_j 给出可信度指标 x_i 的评估值, 用三元直觉模糊数 $\alpha_i(e_j) = (t_{\alpha_i}(e_j), f_{\alpha_i}(e_j), \pi_{\alpha_i}(e_j))$ 表示, 由此得到直觉模糊数评估矩阵 $C = (\alpha_i(e_j))_{n \times m}$.

Step 3: 由仲裁者群组给出表示评估专家 e_j 给出的直觉模糊数评估值可靠性的广义参量集 $G(e_j) = \{\delta_1(e_j), \delta_2(e_j), \dots, \delta_l(e_j)\}$, 其中 $\delta_k(e_j) = (t_{\delta_k}(e_j), f_{\delta_k}(e_j), \pi_{\alpha_i}(e_j)) (k = 1, 2, \dots, l)$ 表示专家 d_k 给出的对评估专家 e_j 的评估值的广义参量, 从而得到广义参量矩阵 $G_{n \times l}$.

Step 4: 将 $G_{n \times l}$ 与 $C_{n \times m}$ 合并, 得到群广义直觉模糊软集评估矩阵 $Q_{n \times (m+l)} = \{C_{n \times m}, G_{n \times l}\}$.

Step 5: 参照 AHP 方法, 群组所有评估专家针对待评对象按照 AHP 的 1 ~ 9 标度设置方法, 分别给出可信度指标之间、仲裁者之间相对重要性的判断矩阵. 参照文献 [19] 所提出的方法, 采用 2-可加模糊测度, 确定可信度指标、评估专家以及仲裁者的独立权重和关联权重.

Step 6: 利用 G-GIFSSCWA 聚合算子将群广义直觉模糊软集评估矩阵 $Q_{n \times (m+1)}$ 的所有元素进行聚合, 得到仿真全局可信度 $cr = (t_{cr}, f_{cr}, \pi_{cr})$.

Step 7: 结合直觉模糊 TOPSIS 方法, 将直觉模糊数仿真全局可信度转化为精确数, 转化步骤如下.

Step 7.1: 确定直觉模糊正理想解和负理想解. 正理想解可表示为一直觉模糊数 $cr^+ = (1, 0, 0)$, 即仿真系统完全可信; 负理想解也可表示为一直觉模糊数 $cr^- = (0, 1, 0)$, 即仿真系统完全不可信.

Step 7.2: 分别计算仿真全局可信度值与正理想解、负理想解的距离, 即

$$\beta^+ = \sqrt{\frac{1}{3}[(t_{cr} - 1)^2 + (f_{cr} - 0)^2 + (\pi_{cr} - 0)^2]}, \tag{18}$$

$$\beta^- = \sqrt{\frac{1}{3}[(t_{cr} - 0)^2 + (f_{cr} - 1)^2 + (\pi_{cr} - 0)^2]}. \tag{19}$$

Step 7.3: 精确值仿真全局可信度值可表示为

$$R = \frac{\beta^-}{\beta^- + \beta^+}. \tag{20}$$

Step 8: 采用 Mac Crimmon 提出的两极比例法^[20], 确定该仿真可信度的可信等级.

4 仿真实例

以 CRH2 型列车组牵引传动故障注入仿真系统为例验证本文方法的有效性. CRH2 型列车牵引传动系统包括从受电弓、主变压器、牵引整流器到牵引电动机、控制单元 TCU^[21] 在内的供电部分和动车组本身的传动控制系统. 本文利用 dSPACE 仿真器和实物控制器搭建该系统的半实物实时仿真系统对该系统进行仿真, 仿真系统实现的总体思路如图 2 所示. 在该仿真系统平台上可以进行无故障和故障注入仿真实验. 其中: 故障注入/模拟 Benchmark 由故障注入基准库、故障注入模块和故障注入控制器组成, 采用修改信号和变量/参数的信号调理方式, 完成牵引传动

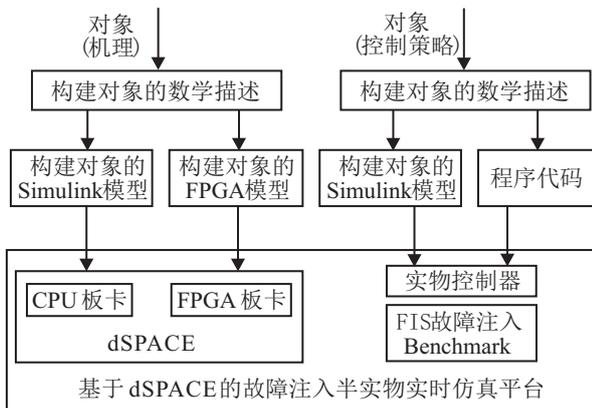


图 2 基于 dSPACE 的牵引传动故障注入仿真系统模型

控制系统各故障模式的注入、仿真/模拟. 以牵引电机转子断条故障注入仿真为例, 仿真实验涉及的牵引变压器二次侧牵引绕组、整流器、中间直流环节、逆变器和牵引电机等部件的参数均采用 CRH2 型高速列车的实际电气参数^[22].

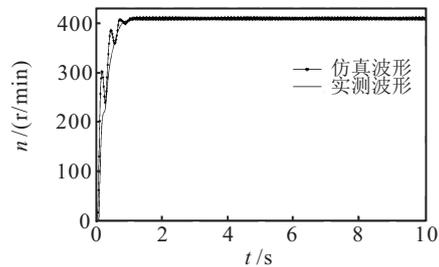
设定列车匀速模式下行驶速度为 200 km/h, 仿真步长为 3×10^{-3} s, 仿真时长为 10 s, 故障注入时间为 1 s. 评估专家组由 4 位领域内专家组成, 用 $E = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ 表示, 仲裁者群组由高速列车组领域的 3 位学者组成, 用 $D = \{d_1, d_2, d_3\}$ 表示.

为验证基于关联假设条件下本文方法的有效性, 分 4 种情况讨论.

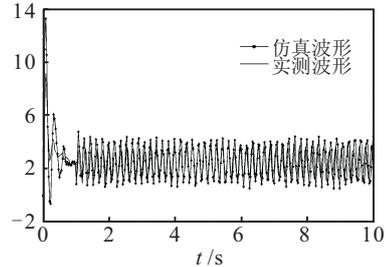
情况 1 可信度指标间、评估专家间和仲裁者间均存在关联关系, 采用第 3 节所提出方法进行仿真可信度评估.

Step 1: 由群组内评估专家及仿真开发人员反复论证并依据车载传感器的实际分布, 设置了牵引电机转子转速和电磁转矩及列车行驶速度 3 个观测点采集仿真信号波形, 并将这 3 个信号的可信度作为可信度指标, 用 $X = \{x_1, x_2, x_3\}$ 表示.

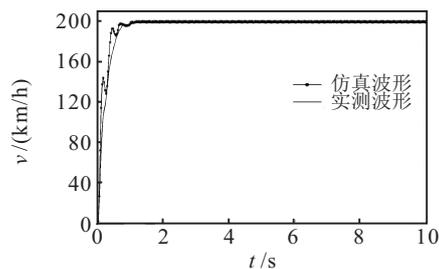
Step 2: 给出 3 个观测点的仿真信号波形与实测信号波形的对比图, 如图 3 所示. 要求评估专家采用



(a) 牵引电机转子转速仿真波形与实测波形对比



(b) 牵引电机电磁转矩仿真波形与实测波形对比



(c) 列车行驶速度仿真波形与实测波形对比

图 3 仿真信号和实测信号对比

目测法对比仿真波形与实测波形, 根据波形的相似程度, 用直觉模糊数给出指标的仿真可信度值.

用 $\alpha_i(e_j) = (t_{\alpha_i}(e_j), f_{\alpha_i}(e_j), \pi_{\alpha_i}(x_i)) (i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3, 4)$ 表示评估专家 e_j 对可信度指标 x_i 的评估值, 其中 $t_{\alpha_i}(e_j)$ 表示可信度, $f_{\alpha_i}(e_j)$ 表示不可信度, $\pi_{\alpha_i}(x_i)$ 表示专家的犹豫度, 得到直觉模糊数评估矩阵 $C_{4 \times 3}$.

Step 3: 由仲裁者群组给出表示评估专家 e_j 所给出的评估值有效性的广义参量值, 用直觉模糊数表示, 得到广义参量矩阵 $G_{4 \times 3}$. 将 $G_{4 \times 3}$ 与 Step 2 中的评估矩阵 $C_{4 \times 3}$ 合并, 得到群广义直觉模糊软集评估矩阵 $Q_{4 \times 6}$ 为

$$Q_{4 \times 6} = \{C_{4 \times 3}, G_{4 \times 3}\} = \left[\begin{array}{cc} (0.90, 0.05, 0.05) & (0.70, 0.20, 0.10) \\ (0.65, 0.15, 0.20) & (0.50, 0.20, 0.30) \\ (0.90, 0.10, 0.00) & (0.60, 0.30, 0.10) \\ (0.70, 0.15, 0.15) & (0.50, 0.35, 0.15) \end{array} \right] \rightarrow \left[\begin{array}{cc} (0.60, 0.10, 0.30) & \mathbf{(0.80, 0.05, 0.15)} \\ (1.00, 0.00, 0.00) & \mathbf{(0.50, 0.25, 0.25)} \\ (0.75, 0.05, 0.20) & \mathbf{(0.55, 0.25, 0.20)} \\ (0.40, 0.25, 0.35) & \mathbf{(0.80, 0.10, 0.10)} \end{array} \right] \leftarrow \left[\begin{array}{cc} \mathbf{(0.60, 0.20, 0.20)} & \mathbf{(0.70, 0.00, 0.30)} \\ \mathbf{(0.70, 0.15, 0.15)} & \mathbf{(0.80, 0.20, 0.0)} \\ \mathbf{(0.80, 0.15, 0.05)} & \mathbf{(1.00, 0.00, 0.00)} \\ \mathbf{(0.70, 0.00, 0.30)} & \mathbf{(0.65, 0.25, 0.10)} \end{array} \right] \leftarrow$$

其中粗体数字为广义参量, 表示 3 位仲裁者分别对评估专家给出的判断信息的可靠性评价.

Step 4: 参照 AHP 方法^[23], 群组内的 4 位评估专家针对待评对象按照 AHP 的 1 ~ 9 标度设置方法, 分别给出可信度指标间、仲裁者间相对重要性的判断矩阵. 用 $A_{3 \times 3}^{(j)} (j = 1, 2, 3, 4)$ 表示专家 e_j 给出的可信度指标判断矩阵, 用 $F_{3 \times 3}$ 表示仲裁者判断矩阵. 经过一致性检验及反复调整后得到满足一致性要求的判断矩阵如下:

$$A^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1/2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, A^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1/4 \\ 1 & 4 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A^{(3)} = \begin{bmatrix} 1 & 3/2 & 3/4 \\ 2/3 & 1 & 3/5 \\ 4/3 & 5/3 & 1 \end{bmatrix}, A^{(4)} = \begin{bmatrix} 1 & 5/4 & 4/5 \\ 4/5 & 1 & 1/2 \\ 4/5 & 2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Step 5: 3 个可信度指标在仿真模型的演算中, 彼

此间存在联系, 因此可以认为这 3 个指标所提供的信息间存在冗余关系. 评估专家和仲裁者知识结构差异较大, 可认为彼此间均为互补关系. 因此采用文献 [19] 提出的 2-可加模糊测度确定方法确定定义在可信度指标集、评估专家集和仲裁者集上的所有 2-可加模糊测度 μ, μ^*, μ' , 分别如表 1~ 表 3 所示.

表 1 定义在集合 X 上的 2-可加模糊测度 μ

可信度指标集	$\mu(e_1)$	$\mu(e_1)$	$\mu(e_1)$	$\mu(e_1)$
\emptyset	0	0	0	0
$\{x_1\}$	0.5003	0.4307	0.3961	0.3818
$\{x_2\}$	0.2034	0.1805	0.2881	0.2876
$\{x_3\}$	0.4443	0.5285	0.4820	0.4973
$\{x_1, x_2\}$	0.6695	0.5761	0.6352	0.6199
$\{x_1, x_3\}$	0.8650	0.8813	0.8099	0.8114
$\{x_2, x_3\}$	0.6135	0.6779	0.7211	0.7354
$\{x_1, x_2, x_3\}$	1	1	1	1

表 2 定义在集合 E 上的 2-可加模糊测度 μ^*

评估专家集	μ^*	评估专家集	μ^*
\emptyset	0	$\{x_2, x_3\}$	0.4033
$\{e_1\}$	0.2003	$\{x_2, x_4\}$	0.3885
$\{e_2\}$	0.1371	$\{x_3, x_4\}$	0.5043
$\{e_3\}$	0.2390	$\{x_1, x_2, x_3\}$	0.6691
$\{e_4\}$	0.2242	$\{x_1, x_2, x_4\}$	0.6543
$\{x_1, x_2\}$	0.3646	$\{x_1, x_3, x_4\}$	0.5820
$\{x_1, x_3\}$	0.4776	$\{x_2, x_3, x_4\}$	0.6958
$\{x_1, x_4\}$	0.4628	$\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$	1

表 3 定义在集合 D 上的 2-可加模糊测度 μ'

仲裁者集	μ'	仲裁者集	μ'
\emptyset	0	$\{d_1, d_2\}$	0.6423
$\{d_1\}$	0.1233	$\{d_1, d_3\}$	0.5562
$\{d_2\}$	0.4012	$\{d_2, d_3\}$	0.8208
$\{d_3\}$	0.3177	$\{d_1, d_2, d_3\}$	1

Step 6: 利用本文提出的 G-GIFSSCWA 聚合算子对群广义直觉模糊软集评估矩阵 $Q_{4 \times 6}$ 的元素进行聚合, 得到仿真全局可信度 $cr = (0.6187, 0.1347, 0.2466)$.

Step 7: 运用直觉模糊 TOPSIS 方法的思想, 按照式 (18) 和 (19) 计算仿真全局可信度值与正理想解、最终的仿真全局可信度值与负理想的距离, 分别为 $\beta^+ = 0.2735, \beta^- = 0.6304$. 利用式 (20) 计算得到精确数仿真全局可信度为 $R = 0.6974$.

Step 8: 采用两极比例法, 确定该仿真可信度的可信等级. 根据两级比例法划分可信度等级, 见表 4.

表 4 仿真可信度等级划分

可信度等级	最低	很低	较低	平均	较高	很高	最高
\emptyset	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1

可见本方案例中, CRH2 型列车组牵引电机转子断条故障注入仿真的可信度等级为较高.

情况 2 评估专家间相互独立, 可信度指标间和仲裁者间均存在关联关系. 利用式 (7) 和 (13) 分别对群广义直觉模糊软集矩阵 $Q_{4 \times 6}$ 的元素进行聚合, 评估专家的独立权重根据文献 [19] 的方法确定.

情况 3 可信度指标相互独立, 评估专家间和仲裁者间均存在关联关系. 利用 G-GIFSSCWA 算子进行聚合, 此时式 (14) 和 (15) 中的可信度指标关联权重 $\mu(B_{\sigma(i)}) - \mu(B_{\sigma(i-1)})$ 变为独立权重 $\omega_{\sigma(i)}$. $\omega_{\sigma(i)}$ 可以根据可信度指标判断矩阵, 通过特征向量法^[23] 求得.

情况 4 仲裁者间相互独立, 评估专家间和可信度指标间均存在关联关系. 利用 G-GIFSSCWA 算子进行聚合, 此时式 (14) 和 (15) 的仲裁者关联权重 $\mu'(B_{\sigma(k)}) - \mu'(B_{\sigma(k-1)})$ 变为独立权重 $\omega'_{\sigma(k)}$. $\omega'_{\sigma(k)}$ 可以根据仲裁者判断矩阵, 通过特征向量法求得.

4 种情况的全局可信度值如表 5 所示.

表 5 4 种情况计算结果的对比

关联关系	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4
全局可信度 (R)	0.6974	0.5842	0.7366	0.6532

由表 6 可知: 情况 2 中计算得到的仿真全局可信度值低于情况 1, 其原因是评估专家间存在互补关系, 忽略该关联会使计算结果被低估; 情况 3 中计算得到的仿真全局可信度值高于情况 1, 其原因是可信度指标间存在冗余关系, 而忽略该关联会使计算结果被高估; 情况 4 中计算得到的仿真全局可信度值低于情况 1, 其原因是仲裁者间存在互补关系, 而忽略该关联会使计算结果被低估.

为进一步验证本文方法的有效性, 采用客观评估方法对该仿真进行可信度评估. 对比两种波形可以发现, 信号变化的总体趋势一致而局部存在差异. 为量化这些差异, 采用特征值分析法对比两个曲线特征量间的误差. 考虑到 Prony 分析^[24] 可以分析出信号的频率、幅值、阻尼因子、相位和能量等特征信息, 本文采用 Prony 分析提取仿真与实测信号的频率、幅值和阻尼 3 个特征, 通过对比这些特征量来衡量信号的差异. 特征量分析的模型为

$$\begin{cases} \gamma_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}, \sigma_i = 1 - \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{\max(y_i, \hat{y}_i)} \right|; \\ C_e = \sum_{i=1}^n \gamma_i \sigma_i. \end{cases} \quad (21)$$

其中: $y_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 和 $\hat{y}_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 分别为实测信号和仿真信号的频率 (幅值、阻尼因子) 序列; σ_i 为第 i 个点的可信度; W_i 为第 i 个点的能量; γ_i 为第 i 个点的权重; C_e 为可信度量化值. 由式 (21) 可

知, 特征量的相似度是一种动态度量, 不仅可以客观地体现信号的整体误差水平, 还可以很好地表征信号的瞬变特征. 基于特征值分析的 3 个观测点仿真信号与实测信号的可信度量化值如表 6 所示. 由于频率、幅值和阻尼相似度均源自于信号特征, 可以认为三者具有同等重要性, 即其权重应相同, 则基于特征分析的可信度指标 x_i 的可信度量化值

$$C_T(x_i) = \frac{1}{3} \sum_{t=1}^3 C_{et}. \quad (22)$$

其中 $t = 1, 2, 3$ 分别对应频率、幅值和阻尼可信度.

表 6 各可信度指标的特可信度

可信度指标	频率 C_{e_1}	幅值 C_{e_2}	阻尼 C_{e_3}	指标可信度 $C_T(x_i)$
x_1	0.8333	0.8538	0.8244	0.8372
x_2	0.7267	0.7340	0.7173	0.7260
x_3	0.8128	0.8362	0.8220	0.8237

采用 Choquet 模糊积分集结 3 个可信度指标的关联权重 (根据表 1 计算得到) 和表 6 中的 3 个指标可信度量化值, 得到基于 4 位评估专家判断的仿真可信度分别为 $cr(e_1) = 0.7362$, $cr(e_2) = 0.7481$, $cr(e_3) = 0.7330$, $cr(e_4) = 0.7218$. 再次使用 Choquet 模糊积分将 $cr(e_1)$, $cr(e_2)$, $cr(e_3)$, $cr(e_4)$ 与评估专家关联权重 (根据表 2 计算得到) 进行聚合, 得到本次故障仿真实验的全局可信度为 $cr^* = 0.7228$. 由表 4 可知, 利用上述基于特征分析的客观评估方法得到的仿真可信度等级为较高, 与本文方法的结论一致.

本文结论是由基于专家主观评判得到, 难免有主观影响存在, 因此与客观评估法得到的量化值存在合理误差. 但本文用直觉模糊数给出主观判断信息, 具有更强的对模糊信息的表达作用, 可以更加准确地表达评估专家对可信度的赞同、反对和犹豫的态度, 在考虑主观因素方面更加细腻, 能有效降低主观意志的不利影响, 且得到的结论与客观评估结论保持一致.

5 结 论

1) 本文提出了群广义直觉模糊软集关联加权平均聚合算子 G-GIFSSCWA, 证明了该算子的若干性质, 给出了 G-GIFSSCWA 聚合算子是基于独立假设的传统聚合算子的推广之结论. G-GIFSSCWA 全面考虑了可信度指标间、评估专家间和仲裁者间的关联关系, 用模糊测度来表征指标、专家和仲裁者的关联权重, 比基于独立假设的聚合算子更符合客观实际, 由此获得的可信度指标的聚合结果更加准确可靠.

2) 给出了一种基于关联群广义直觉模糊软集的仿真可信度指标聚合方法. 将 G-GIFSS 理论与直觉模糊 TOPSIS 方法相结合, 共同应用于仿真可信度的

主观评估过程. 该方法综合了群组评价和模糊判断的优点, 提高了决策者的主观表述能力, 降低了单方面主观偏好对评估结论的不利影响.

3) 通过 CRH2 型高速列车组牵引电机转子断条故障注入仿真可信度评估实例, 验证了本文方法的正确性和有效性, 且本文方法计算简便, 具有普遍实用性, 为仿真可信度的主观评估过程提供了一种新的正确有效的可信度指标聚合方法.

参考文献 (References)

- [1] 王子才. 关于仿真实理论的探讨 [J]. 系统仿真学报, 2000, 12(6): 604-608.
(Wang Z C. Research on simulation theory[J]. J of System Simulation, 2000, 12(6): 604-608.)
- [2] Liu F, Yang M. An optimal design method for simulation verification, validation and accreditation schemes[J]. Simulation, 2009, 85(6): 375-386.
- [3] Unmeel B M, Dean R E. The JANNAF simulation credibility guide on verification, uncertainty propagation and quantification, and validation(Invited)[C]. The 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. Florida: IEEE Press, 2015: 1233-1245.
- [4] 霍瑛, 庄毅, 薛羽. 基于群体一致性强度的模糊评估方法 [J]. 控制与决策, 2014, 29(1): 153-157.
(Huo Y, Zhuang Y, Xue Y. Method of fuzzy evaluation based on group consistency intensity[J]. Control and Decision, 2014, 29(1): 153-157.)
- [5] 张忠, 方可, 杨明. 基于群组 AHP 的复杂仿真系统可信度评估方法 [J]. 系统工程与电子技术. 2011, 33(11): 2569-2572.
(Zhang Z, Fang K, Yang M. Method for complex simulation credibility evaluation based on group AHP[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(11): 2569-2572.)
- [6] Gulcin B, Sezin G. A new integrated intuitionistic fuzzy group decision making approach for product development partner selection[J]. Computer and Industrial Engineering, 2016, 102(2): 383-395.
- [7] Maji P K, Biswas R, Roy A R. Intuitionistic fuzzy soft sets[J]. J of Fuzzy Mathematics, 2001, 9(3): 677-692.
- [8] Maji P K, Roy A R, Biswas R. On intuitionistic fuzzy soft sets[J]. J of Fuzzy Mathematics, 2004, 12(3): 669-684.
- [9] Agrawl M, Biswas K K, Hanmandlu M. Generalized intuitionistic fuzzy soft sets with applications in decision-making[J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(8): 3552-3566.
- [10] 武华, 苏秀琴. 基于群广义直觉模糊软集的空袭目标威胁评估方法 [J]. 控制与决策, 2015, 30(8): 1462-1468.
(Wu H, Su X Q. Threat assessment of aerial targets based on group generalized intuitionistic fuzzy soft sets[J]. Control and Decision, 2015, 30(8): 1462-1468.)
- [11] 张忠, 方可, 杨明. 基于 2-可加模糊测度的仿真可信度评估方法 [J]. 控制与决策, 2013, 28(1): 147-151.
(Zhang Z, Fang K, Yang M. Method for simulate credibility evaluation based on 2-additive fuzzy measures[J]. Control and Decision, 2013, 28(1): 147-151.)
- [12] Teresa G, Rocío A C. A new measure of consensus with reciprocal preference relations: The correlation consensus degree[J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 107(1): 104-116.
- [13] Xu Z S. Choquet integrals of weighted intuitionistic fuzzy information[J]. Information Sciences, 2010, 180(5): 726-736.
- [14] David W. Supplier selection for development of petroleum industry facilities, applying multi-criteria decision making techniques including fuzzy and intuitionistic fuzzy TOPSIS with flexible entropy weighting[J]. J of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 28(1): 594-612.
- [15] Atanassov K T. Intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1986, 20(1): 87-96.
- [16] Xu Z S. Intuitionistic preference relations and their application in group decision making[J]. Information Science, 2007, 177(11): 2363-2379.
- [17] Sugeno M. Theory of fuzzy integral and its application[D]. Tokyo: Tokyo Institute of Technology, 1974: 43-45.
- [18] Grabisch M. K-order additive discrete fuzzy measure[C]. Proc of 6th Int Conf on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-based System. New York: IEEE Press, 1996: 1345-1350.
- [19] Li S, Peng X Q, Peng T, et al. A group evaluation method for complex simulation system credibility based on 2-order additive fuzzy measure[C]. 2016 Chinese Control and Decision Conf. Yinchuan, 2016: 122-128.
- [20] Li Y, Li Y H, Han Z J, et al. Determination of optimal opening scheme for electromagnetic loop networks based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016(3): 1-11.
- [21] 冯江华, 王坚, 李江红. 高速列车牵引传动系统综合仿真平台的分析与设计 [J]. 铁道学报, 2013, 34(2): 22-26.
(Feng J H, Wang J, Li J H. Integrated simulation platform of high-speed train traction drive system[J]. J of the China Railway Society, 2013, 34(2): 22-26.)
- [22] 汪斌. 列车牵引传动系统性能分析和仿真技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2013.
(Wang B. The research on performance analysis and simulation technology of traction drive system[D]. Hangzhou: College of Electrical Engineering, Zhejiang University, 2013.)
- [23] 张炳江. 基于方案修订的群决策一致性形成的研究 [J]. 控制与决策, 2014, 29(10): 1914-1920.
(Zhang B J. Research on consistency formation of group decision making based on alternative adjustment[J]. Control and Decision, 2014, 29(10): 1914-1920.)
- [24] Chen Y X, Wu X Y, Bu X W. EMMD-Prony approach for dynamic validation of simulation models[J]. J of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(1): 172-181.

(责任编辑: 孙艺红)