

基于直觉模糊AHP和模糊MAIRCA的故障模式与影响分析

彭书勤¹, 吕琛², 黄大荣³, 程玉杰^{2†}, 赵玲¹

(1. 重庆交通大学 信息科学与工程学院, 重庆 400074; 2. 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100191;

3. 安徽大学 人工智能学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 故障模式与影响分析(FMEA)是一种主动的风险评估技术,其主要目的是根据其风险水平对故障模式进行排序,并执行后续行动以消除或减轻其后果.为克服传统FMEA技术通过风险优先级数(RPN)来确定关键故障模式带来的缺陷.本文提出了一种新的集成多准则决策(MCDM)方法,即将直觉模糊层次分析过程(IFAHP)与改进的模糊多属性理想现实比较分析(FMAIRCA)相结合.首先,本文通过IFAHP方法来计算风险因素权值;然后,使用本文提出的改进FMAIRCA模型推导出故障模式的排序;此外,在整个过程中还考虑了专家的客观权重;最后,考虑FMEA领域中的一个案例来验证所提出的方法,结果表明,本文提出的方法为FMEA的风险评估提供一种实用而有效的方法.

关键词: 故障模式与影响分析;直觉模糊层次分析法;模糊MAIRCA

引用格式: 彭书勤,吕琛,黄大荣,等.基于直觉模糊AHP和模糊MAIRCA的故障模式与影响分析.控制理论与应用,2025,42(1):127–137

DOI: 10.7641/CTA.2023.21014

Fault mode and effectiveness analysis based on intuitionistic fuzzy AHP and fuzzy MAIRCA

PENG Shu-qin¹, LÜ Chen², HUANG Da-rong³, CHENG Yu-jie^{2†}, ZHAO Ling¹

(1. School of Information Science & Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. School of Artificial Intelligence, Anhui University, Hefei Anhui 230601, China)

Abstract: Failure mode and effect analysis (FMEA) is an active risk assessment technology, which is mainly used to sort failure modes according to their risk levels and implement follow-up actions to eliminate or mitigate their consequences. To overcome the defects caused by the traditional FMEA technology, the risk priority number (RPN) is used to determine the critical failure mode. In this paper, a new integrated multi criteria decision making (MCDM) method is proposed, which combines intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process (IFAHP) with improved fuzzy multi-attribute ideal reality comparative analysis (FMAIRCA). Firstly, this paper calculates the weight of risk factors through IFAHP method, and then deduces the order of failure modes using the improved FMAIRCA model proposed in this paper. In addition, the objective weight of experts is also considered in the whole process. Finally, a case in the FMEA field is considered to verify the proposed method, the results show that the proposed method provides a practical and effective method for the FMEA risk assessment.

Key words: failure mode and effect analysis; intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process; fuzzy multi-attribute ideal real comparative analysis

Citation: PENG Shuqin, LÜ Chen, HUANG Darong, et al. Fault mode and effectiveness analysis based on intuitionistic fuzzy AHP and fuzzy MAIRCA. *Control Theory & Applications*, 2025, 42(1): 127 – 137

收稿日期: 2022–11–16; 录用日期: 2023–11–22.

†通信作者. E-mail: yujiecheng.ok@163.com; Tel.: +86 10-82339346.

本文责任编辑: 张友民.

“十三五”国防技术基础科研项目(JSZL2019207B008), 国家自然科学基金项目(62073051), 重庆市技术创新与应用发展专项重点项目(cstc2019jcsx-mbdxX0015), 重庆教委重点科研项目(KJZD-K201900704)资助.

Supported by the 13th Five-Year Plan for National Defense Technology Basic Scientific Research Project (JSZL2019207B008), the National Natural Science Foundation of China (62073051), the Technological Innovation and Application Development Special Key Project of Chongqing (cstc2019jcsx-mbdxX0015) and the Key Scientific Research Project of Chongqing Education Commission (KJZD-K201900704).

1 引言

故障模式与影响分析(failure mode and effect analysis, FMEA)是一种系统的活动,以识别潜在的故障模式,分析其影响,并采取必要的措施,以确保系统、产品和服务的安全性和可靠性^[1]. FMEA方法起源于20世纪60年代的美国军方,作为一种可靠性评估技术来评估系统和设备故障,被首次用于航空航天领域^[2]. 与其他事后可靠性分析方法不同, FMEA是一种主动的风险管理技术,侧重于在系统故障模式发生之前识别和分析它们. FMEA的适当实施可以缩短产品开发时间,降低开发成本,提高产品的可靠性,最终提高客户满意度. 因此, FMEA方法已成为一种基本的、核心的质量管理工具,用于提高医疗保健^[3]、航空航天^[4]、制造^[5]、运输^[6]、化工^[7]和汽车^[8]行业的可靠性.

一般来说, FMEA中故障模式的风险顺序是由风险优先级数(risk priority number, RPN)决定的,通过将风险因素的严重性(severity, S)、发生性(occurrence, O)和检测性(detection, D)相乘得到的. 这些风险因素都以10分制进行衡量,其中S和O的值越大,严重程度越高,故障发生的机率也越高, D的顺序恰好相反,值越高,故障模式的检测频率就越低^[9]. 因此,较高的RPN意味着故障模式更关键,更需要注意提高系统的性能. 虽然FMEA有助于防止故障和错误的发生,但传统的方法在实际应用中存在许多缺点^[10-12]: 1) 计算PRN值的公式仍然存在质疑,缺乏完整的科学依据. 例如,风险因素S, O和D评分的不同组合可能会产生相同的PRN值,但它们的影响可能不同. RPN得分是通过3个离散的顺序尺度进行相乘得到的,但在顺序尺度上进行乘法是没有意义的; 2) 风险因素被认为是同等重要的. 在应用中,这种假设是不现实的,因为它们通常在风险因素的权重上有所不同; 3) 根据1~10的数值对风险进行评估. 由于不同的主客观约束,专家使用精确的值来评估故障模式的风险值是不现实的. 相反,专家更喜欢用语言术语两两比较来表达他们的判断^[13-17]. 在考虑多种风险因素的情况下,确定故障模式的风险优先级可以视为一个多准则决策(multi-criteria decision making, MCDM)问题^[18]. 因此,许多MCDM方法被应用于抵消传统FMEA的缺点. 文献[19-20]对MCDM方法在解决FMEA问题中的应用进行了全面的综述. 文献[21]进一步对MCDM方法进行了分类,并阐明了在解决FMEA问题的潜力. 当模糊逻辑与MCDM方法集成时,它能提供更多可行的选择^[22].

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是大多数研究人员和行业中最常用的决策工具之一^[23],它已被广泛应用于与MCDM问题相关的应用上^[24]. 经典的AHP考虑决策者的清晰判断,但不包括他们模糊

的想法^[25-27]. 在决策过程中,决策者不可能准确地评估有关方案的标准值,文献[22]中提出的模糊逻辑理论是解决这类问题的可行替代方案. 虽然模糊逻辑理论有了一些进展^[28-29],但它在数学上更简单,并且可以为大多数复杂的MCDM问题的理性决策提供坚实的基础. 但是模糊层次分析法不能表示不确定决策信息,主观性过强,客观上对评价结果产生一定影响. 因此,本文引入直觉模糊层次分析法(intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process, IFAHP)削弱人为主观性过强的问题.

多属性理想现实比较分析(multi-attribute ideal real comparative analysis, MAIRCA)是由贝尔格莱德国防大学物流研究中心的Pamuar等^[30]开发的一种新的MCDM方法. 这种方法已被证明是稳定的,对比其他流行的MCDM方法,如优劣解距离法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)^[25]或模糊多准则妥协解排序法(fuzzy VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, FVIKOR)^[31],它计算简单,便于理解,且可以与其他算法相结合,具有一定的研究前景. 在文献[30]中,它与模糊决策试验评价实验室(decision making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)相结合进行铁路平交选择; 文献[32]提出了一个结合模糊DEMATEL-MAIRCA方法进行可持续多模态逻辑中心选择的框架; 文献[13]将MAIRCA应用到FMEA领域,并对其改进,减少计算难度和计算步骤. 但研究过程中,对每位专家成员赋予相同的权重,未考虑专家权重值对排序结果的影响. FMEA是一种群体决策活动,可能会在专家之间产生冲突. 因此,本文在文献[13]的基础上引入决策意见一致度对MAIRCA进行改进,提出一种新的集成MCDM方法,即将直觉模糊层次分析法(IFAHP)与改进的模糊多属性理想现实比较分析(fuzzy multi-attribute ideal real comparative analysis, FMAIRCA)相结合,来确定故障模式的风险优先级. 本文主要贡献如下:

1) 引入直觉模糊集理论,专家可以评价不同类型的模糊性. 在应用中, FMEA团队成员可以使用更灵活、更丰富的表达方式更准确地表示他们的主观判断;

2) 考虑了风险因素的相对重要性,不再被认为是同等重要的;

3) 引入决策意见一致度对MARICA进行改进,使结果更为合理;

4) 所提出的方法可以克服RPN简单乘法操作的缺陷,得到更准确可信的结果. 此外,所提方法可应用于解决具有多风险因素的问题. 除本文提到的3种风险因素外,其他重要的风险因素,如故障模式之间的相

互关系、故障成本、纠正措施成本等,也可以纳入。

2 理论基础

2.1 模糊集理论

Zadeh引入了模糊集理论,以克服各种决策方面所固有的模糊性。模糊集 \tilde{A} 可通过隶属函数 $\mu_{\tilde{A}}(x)$ 进行数学定义,该函数将元素集中的每个元素 x 赋给区间 $[0,1]$ 中的一个实数^[22]。模糊数是元素集 X 中的一个模糊子集,它是凸的和正规的。对于所有 X 中的 x_1, x_2 ,当且仅当 $\mu_{\tilde{A}}(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min(\mu_{\tilde{A}}(x_1), \mu_{\tilde{A}}(x_2))$ 时,模糊集 \tilde{A} 是凸的,其中 $\lambda \in [0, 1]$ 。类似的,如果 $x_i \in X, \mu_{\tilde{A}}(x_i) = 1$,模糊集 \tilde{A} 被称为正规模糊集。模糊数有不同的类型,其中三角模糊数(triangular fuzzy number, TFN)主要是由于其直观性和计算效率高的表示。一个TFN由一个三元组 $\tilde{A} = [a_l \ a_m \ a_u]$ 表示,一个TFN的成员资格函数被定义为

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x - a_l}{a_m - a_l}, & a_l \leq x \leq a_m, \\ \frac{x - a_u}{a_m - a_u}, & a_m \leq x \leq a_u, \\ 0. & \end{cases} \quad (1)$$

为方便排序、比较,模糊数通常需要转换为一个清晰的数字,这种转换方法称为去模糊化^[33]。在几种常用的方法中,分段平均数法是最常用的,因为其计算简单。

$$A = \frac{a_l + 4a_m + a_u}{6}. \quad (2)$$

2.2 直觉模糊集理论

计算风险因素的相对重要性被认为是FMEA中的一项必要任务,为削弱传统模糊集人为主观性过强的问题,引入直觉模糊集理论。Atanassov和Stoeva基于模糊集理论进行了扩展,提出了直觉模糊集的概念,可以更丰富的描述不确定性评估信息^[34-35]。下面对直觉模糊集的相关理论进行介绍。直觉模糊集 $A = \{ \langle x, \mu_A(x), \nu_A(x) | x \in X \rangle \}$ 可以通过隶属度 $\mu_A(x)$ 和非隶属度 $\nu_A(x)$ 进行定义,即

$$\begin{cases} \mu_A : X \rightarrow [0, 1], & x \in X \rightarrow \mu_A(x) \in [0, 1], \\ \nu_A : X \rightarrow [0, 1], & x \in X \rightarrow \nu_A(x) \in [0, 1], \end{cases} \quad (3)$$

并且 $0 \leq \mu_A(x) + \nu_A(x) \leq 1, x \in X$ 。 $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x), x \in X$ 表示直觉模糊集 A 中元素 x 的犹豫或不确定性:当 $\pi_A(x) = 0$ 时,直觉模糊集 A 就是一个模糊集。由 $\mu_A(x)$ 和 $\nu_A(x)$ 组成的有序对 $\langle \mu_A(x), \nu_A(x) \rangle$ 称为直觉模糊数。

3 IFAHP-FMAIRCA模型

为考虑专家权重值对排序结果的影响,得到合理的排序结果,本文在文献[13]的基础上引入决策意见一致度求解MAIRCA中专家的权重,对MAIRCA进行

改进。同时,为削弱FAHP人为主观性过强的问题,采用IFAHP求解风险因素的相对重要度。所提出的方法包括以下几个主要的步骤,工作流程图如图1所示:1) 构建问题;2) 计算指标的权重;3) 计算FMAIRCA中专家的权重;4) 对故障模式进行排序。在接下来的各小节中,将详细说明上述步骤。

3.1 构建问题

在决策过程的初始阶段,决策者都应该对目标有一个想法。在本文中,主要目的是通过所提出的方法来选择关键的故障模式。在那之后,高层管理人员将选择跨专业的专家,因为他们对故障有一定的了解。之后,这些专家先确定评估过程中的评估标准,并选择适当的语言术语集来评估标准和故障模式。

3.2 指标权重的计算

在本小节,本文采用IFAHP法,聘请行业或领域内权威专家根据实际情况对风险因素进行两两比较打分,然后,根据打分情况对直觉模糊判断矩阵进行一致性检验和修正,最后,确定风险因素的相对重要性。本文将使用文献[36]中给出的直觉模糊层次分析法的计算步骤。

判断矩阵是决策者表达偏好信息的一种通用且有效的方式,能更全面、详细、直观地描述决策者的偏好信息。在专家的建议下,使用语言术语对标准建立了两两比较矩阵。假设有 k 名专家参与了决策过程,两两比较矩阵 R^k 中的每个元素 r_{ij}^k 是对应该语言评价的一个直觉模糊数,两两比较矩阵由式(4)给出:

$$\begin{cases} R^1 = \begin{pmatrix} 1 & r_{12}^1 & \cdots & r_{1n}^1 \\ r_{21}^1 & 1 & \cdots & r_{2n}^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1}^1 & r_{n2}^1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}, \\ \vdots \\ R^k = \begin{pmatrix} 1 & r_{12}^k & \cdots & r_{1n}^k \\ r_{21}^k & 1 & \cdots & r_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1}^k & r_{n2}^k & \cdots & 1 \end{pmatrix}, \end{cases} \quad (4)$$

其中: $r_{ij} = (\mu_{ij}, \nu_{ij})$, μ_{ij} 表示决策者在进行两两比较时更偏好于 i 的程度, ν_{ij} 表示决策者偏好于 j 的程度, $\pi_{ij} = 1 - \mu_{ij} - \nu_{ij}$ 则表示决策者不确定性。

根据决策者提供的指标偏好信息,构建的直觉模糊判断矩阵中可能会出现A比B重要,B比C重要,而C又比A重要的矛盾情况。为避免这样的情况出现,需要对各指标之间的重要度的协调性进行检验。采用文献[36]中的一致性检验算法来构造乘法一致性直觉模糊判断矩阵 $\bar{R} = (\bar{r}_{ij})_{n \times n}$,一致性直觉模糊判断矩阵由下式给出:

当 $j > i + 1$ 时, $\bar{r}_{ij} = (\bar{\mu}_{ij}, \bar{v}_{ij})$, 其中:

$$\bar{\mu}_{ij} = \frac{\sqrt[j-i-1]{\prod_{t=i+1}^{j-1} \mu_{it} \mu_{tj}}}{\sqrt[j-i-1]{\prod_{t=i+1}^{j-1} \mu_{it} \mu_{tj} + \sqrt[j-i-1]{\prod_{t=i+1}^{j-1} (1-\mu_{it})(1-\mu_{tj})}}}, \quad (5)$$

$$\bar{v}_{ij} = \frac{\sqrt[j-i-1]{\prod_{t=i+1}^{j-1} v_{it} v_{tj}}}{\sqrt[j-i-1]{\prod_{t=i+1}^{j-1} v_{it} v_{tj} + \sqrt[j-i-1]{\prod_{t=i+1}^{j-1} (1-v_{it})(1-v_{tj})}}}. \quad (6)$$

当 $j = i + 1$ 或 $j = i$ 时, $\bar{r}_{ij} = r_{ij}$; 当 $j < i$ 时, $\bar{r}_{ij} =$

$(\bar{v}_{ij}, \bar{\mu}_{ij})$.

对于直觉模糊判断矩阵 \mathbf{R} 和一致性直觉模糊判断矩阵 $\bar{\mathbf{R}}$, 如果 \mathbf{R} 与 $\bar{\mathbf{R}}$ 之间的距离度量满足式(7), 则认为满足一致性检验.

$$d(\bar{\mathbf{R}}, \mathbf{R}) < \tau, \quad (7)$$

其中 τ 为一致性指标的阈值. Saaty 从一致性直觉判断矩阵的最大特征值和随机过程中推导出一致性比, 并且指出, 如果一致性比小于 0.1, 则认为一致性是可接受的. 因此, 一般取 $\tau = 0.1$ ^[37]. 距离测度由式(8)给出:

$$d(\bar{\mathbf{R}}, \mathbf{R}) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (|\bar{\mu}_{ij} - \mu_{ij}| + |\bar{v}_{ij} - v_{ij}| + |\bar{\pi}_{ij} - \pi_{ij}|)}{2(n-1)(n-2)}. \quad (8)$$

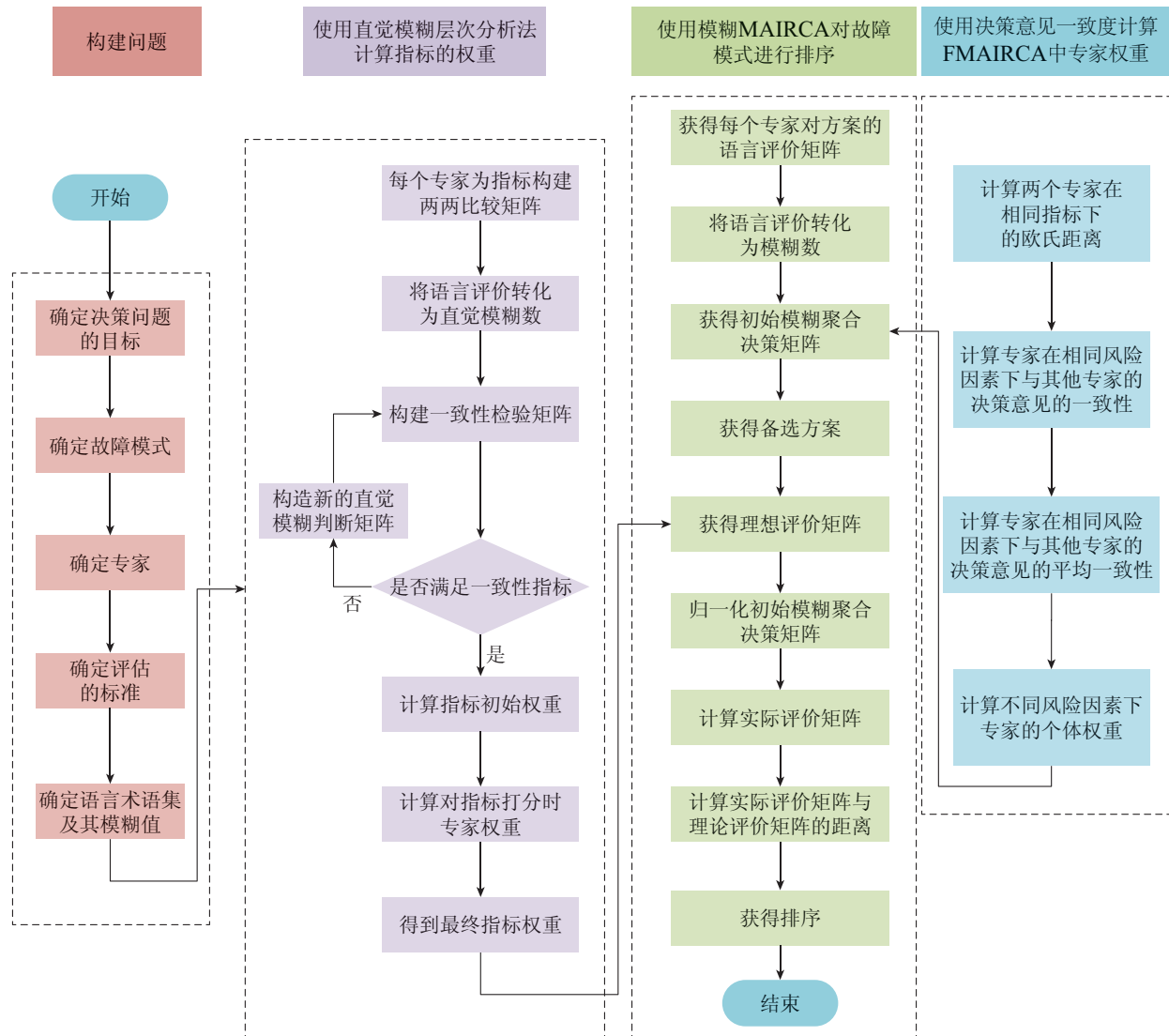


图1 所提方法的流程图

Fig. 1 Flow chart of the proposed method

对于不满足一致性检验的直觉模糊判断矩阵, 即 $d(\tilde{\mathbf{R}}, \mathbf{R}) \geq \tau$, 需要对其进行修正, 使得修正后的直觉模糊判断矩阵不仅满足一致性检验, 而且, 尽可能地保持决策者的原始偏好信息. 引入修正因子 $\sigma (0 \leq \sigma \leq 1)$, 然后, 利用下面的式子对 \mathbf{R} 进行修正, 构造新的直觉模糊判断矩阵 $\mathbf{R}' = (r'_{ij})_{n \times n}, i = 1, 2, \dots, n$. 新的直觉模糊判断矩阵由式(9)–(10)给出:

$$\mu'_{ij} = \frac{\mu_{ij}^{1-\sigma} \bar{\mu}_{ij}^{\sigma}}{\mu_{ij}^{1-\sigma} \bar{\mu}_{ij}^{\sigma} + (1 + \mu_{ij})^{1-\sigma} (1 - \bar{\mu}_{ij})^{\sigma}}, \quad (9)$$

$$v'_{ij} = \frac{v_{ij}^{1-\sigma} \bar{v}_{ij}^{\sigma}}{v_{ij}^{1-\sigma} \bar{v}_{ij}^{\sigma} + (1 + v_{ij})^{1-\sigma} (1 - \bar{v}_{ij})^{\sigma}}, \quad (10)$$

其中 σ 是可以由决策者控制的参数, σ 值越小, \mathbf{R} 与 \mathbf{R}' 越接近. 如果 $\sigma = 0$, 则 $\mathbf{R}' = \mathbf{R}$; 如果 $\sigma = 1$, 则 $\mathbf{R}' = \tilde{\mathbf{R}}$.

对不符合一致性检验的一致性直觉模糊判断矩阵进行重新构造, 可以获得新的直觉模糊判断矩阵 \mathbf{R}' , 再进行一致性检验, 如此循环反复, 直至符合一致性检验为止, 最后, 修正的新矩阵便是满足要求的直觉模糊判断矩阵, 记作 $\mathbf{R} = (r_{ij})_{n \times n}$.

对满足一致性检验的直觉模糊判断矩阵, 利用归一化秩求和的方法获得同层指标间的权重向量 $\omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_n]$, 由式(11)给出:

$$\omega_i = \left(\frac{\sum_{j=1}^n \mu_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (1 - v_{ij})} \quad 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (1 - v_{ij})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \mu_{ij}} \right). \quad (11)$$

由于式(11)还是直觉模糊矩阵, 需要引入模糊转换函数为其转换为单数权值, 转换函数由式(12)给出:

$$W = (\omega_j)_n = \frac{\mu_i + \pi_i \left(\frac{\mu_i}{\mu_i + v_i} \right)}{\sum_{j=1}^n \left[\mu_i + \pi + i \left(\frac{\mu_i}{\mu_i + v_i} \right) \right]}. \quad (12)$$

熵是刻画直觉模糊集不确定程度的一种方法, 因此, 可以使用直觉模糊熵来反映专家的不确定性程度, 从而计算专家的权值. 专家 k 对指标 i 判断矩阵的直觉模糊熵由式(13)给出^[38]:

$$E_i^k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1 - |\mu_{ij} - v_{ij}| + \pi_{ij}}{1 + |\mu_{ij} - v_{ij}| + \pi_{ij}}, \quad (13)$$

$E_i^k \in [0, 1]$, 值越小则代表直觉模糊判断矩阵信息的不确定程度越小. 专家 k 的权重系数为

$$\lambda_k = \frac{1 - \sum_{i=1}^n \omega_i^k E_i^k}{N - \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^n \omega_i^k E_i^k}. \quad (14)$$

最终的指标权值 $\omega_i^* = \lambda_k \omega_i$, 即对指标打分时专家权重与初始权重的矢量积.

3.3 FMAIRCA中专家权重的计算

FMEA是一种群体决策活动, 可能会在专家之间

产生冲突, 因此, 需要考虑专家意见与专家团队意见的一致性. 也就是说, 既尊重专家个体的权威性, 也照顾到了整个专家团队的一致意见. 在本小节, 将在考虑专家群体意见一致性的情况下使用语言评价矩阵确定专家在不同风险因素下的权重, 以改进第3.4节初始模糊聚合矩阵的构建(式21).

两个三角模糊数 $\tilde{\mathbf{A}} = [a_l \ a_m \ a_u]$, $\tilde{\mathbf{B}} = [b_l \ b_m \ b_u]$ 之间的距离可以用欧式距离来度量, 由式(15)给出:

$$d(\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}) = \sqrt{\frac{(a_l - b_l)^2 + (a_m - b_m)^2 + (a_u - b_u)^2}{3}}. \quad (15)$$

用式(16)来衡量两个专家在相同的指标下对于所有方案的决策意见的一致度, 即

$$s_j(p, q) = \sum_{i=1}^m d(\tilde{A}_{21}^p, \tilde{A}_{21}^q), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

在相同的指标下, 计算衡量某一专家 k 与其他专家决策意见的平均一致度. 平均一致度由式(17)给出:

$$\bar{s}_j^k = \frac{1}{K - 1} \sum_{l=1, l \neq k}^K s_j(k, l). \quad (17)$$

由于平均一致度反应了专家 k 与团队意见的一致性程度, 越高说明越能代表团队意见, 越低说明与团队意见的偏差越大. 于是, 考虑专家群体意见一致性的专家个体权重可用式(18)归一化:

$$\omega^{jk} = \frac{\bar{s}_j^k}{\sum_{k=1}^K \bar{s}_j^k}. \quad (18)$$

3.4 故障模式的排序

在本小节, 将使用上一小节得出的专家权重对 MAIRCA方法进行改进, 对所有故障模式进行排序, 使结果更准确.

步骤 1 构造初始语言决策矩阵. 根据决策者的偏好构造初始语言决策矩阵 \mathbf{D}_L , 考虑有 k 个专家参与了关于 n 个指标的 m 个方案的评估过程. 所得到的决策矩阵由式(19)给出:

$$\mathbf{D}_L = \begin{pmatrix} [L_{11}^1 \ \dots \ L_{11}^k] & [L_{12}^1 \ \dots \ L_{12}^k] & \dots \\ [L_{21}^1 \ \dots \ L_{21}^k] & [L_{22}^1 \ \dots \ L_{22}^k] & \dots \\ \vdots & \vdots & \\ [L_{m1}^1 \ \dots \ L_{m1}^k] & [L_{m2}^1 \ \dots \ L_{m2}^k] & \dots \\ [L_{1n}^1 \ \dots \ L_{1n}^k] \\ [L_{2n}^1 \ \dots \ L_{2n}^k] \\ \vdots \\ [L_{mn}^1 \ \dots \ L_{mn}^k] \end{pmatrix}. \quad (19)$$

根据使用模糊数的评分量表, 每个语言决策都被转化为各自的模糊数.

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{D}^{(1)} = \begin{pmatrix} \tilde{A}_{11}^{(1)} & \tilde{A}_{12}^{(1)} & \dots & \tilde{A}_{1n}^{(1)} \\ \tilde{A}_{21}^{(1)} & \tilde{A}_{22}^{(1)} & \dots & \tilde{A}_{2n}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{A}_{m1}^{(1)} & \tilde{A}_{m2}^{(1)} & \dots & \tilde{A}_{mn}^{(1)} \end{pmatrix}, \\ \vdots \\ \tilde{D}^{(k)} = \begin{pmatrix} \tilde{A}_{11}^{(k)} & \tilde{A}_{12}^{(k)} & \dots & \tilde{A}_{1n}^{(k)} \\ \tilde{A}_{21}^{(k)} & \tilde{A}_{22}^{(k)} & \dots & \tilde{A}_{2n}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{A}_{m1}^{(k)} & \tilde{A}_{m2}^{(k)} & \dots & \tilde{A}_{mn}^{(k)} \end{pmatrix}. \end{array} \right. \quad (20)$$

步骤 2 构造初始模糊聚合决策矩阵. 引入专家权重对聚合决策矩阵进行改进, 使结果更合理, 更准确.

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{D} = \begin{pmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} & \dots & \tilde{A}_{1n} \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} & \dots & \tilde{A}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{A}_{m1} & \tilde{A}_{m2} & \dots & \tilde{A}_{mn} \end{pmatrix}, \\ \tilde{A}_{11} = \frac{\omega^{11}\tilde{A}_{11}^{(1)} + \omega^{12}\tilde{A}_{11}^{(2)} + \dots + \omega^{1k}\tilde{A}_{11}^{(K)}}{k}, \end{array} \right. \quad (21)$$

其中: $\omega^j = [\omega^{j1} \ \omega^{j2} \ \dots \ \omega^{jk}]$, $j=1, 2, \dots, n$ 表示指标 j 下每个专家的权重, ω^j 为上一小节求得的专家权重.

步骤 3 根据备选方案 P_{A_i} 的选择来定义偏好, 这意味着决策者对选择每一个替代方案是无害的. 理论上, 每个方案被选择的概率是相同的, 因此决策者对于每个选择的偏好是一样的, 偏好由式(22)给出:

$$P_{A_i} = \frac{1}{m}, \sum_{i=1}^m P_{A_i} = 1. \quad (22)$$

步骤 4 构造理论评价矩阵. 模糊理论评价矩阵 \tilde{T}_{P_A} 的元素是通过根据备选 P_{A_i} 的偏好和使用FA-HP获得的风险因素权重相乘来计算的. 理论评价矩阵由式(23)给出:

$$\tilde{T}_{P_A} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m}\tilde{\omega}_1 & \frac{1}{m}\tilde{\omega}_2 & \dots & \frac{1}{m}\tilde{\omega}_n \\ \frac{1}{m}\tilde{\omega}_1 & \frac{1}{m}\tilde{\omega}_2 & \dots & \frac{1}{m}\tilde{\omega}_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{1}{m}\tilde{\omega}_1 & \frac{1}{m}\tilde{\omega}_2 & \dots & \frac{1}{m}\tilde{\omega}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{t}_{p11} & \tilde{t}_{p12} & \dots & \tilde{t}_{p1n} \\ \tilde{t}_{p21} & \tilde{t}_{p22} & \dots & \tilde{t}_{p2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{t}_{pm1} & \tilde{t}_{pm2} & \dots & \tilde{t}_{pmn} \end{pmatrix}. \quad (23)$$

步骤 5 归一化. 为提高其可比能力, 需进行归一化处理, 对步骤2得到的模糊聚合决策矩阵进行归一化, 得到模糊归一化决策矩阵 \tilde{N} . 由式(24)给出:

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{ij}^1 = \frac{a_{ij}^1}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [(a_{ij}^1)^2 + (a_{ij}^m)^2 + (a_{ij}^u)^2]}}, \\ n_{ij}^m = \frac{a_{ij}^m}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [(a_{ij}^1)^2 + (a_{ij}^m)^2 + (a_{ij}^u)^2]}}, \\ n_{ij}^u = \frac{a_{ij}^u}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [(a_{ij}^1)^2 + (a_{ij}^m)^2 + (a_{ij}^u)^2]}}. \end{array} \right. \quad (24)$$

步骤 6 构造实际评价矩阵. 将去模糊化的归一化决策矩阵的元素乘以理论评价矩阵的元素. 由式(25)给出:

$$\tilde{T}_{r_A} = \begin{pmatrix} \tilde{t}_{r11} & \tilde{t}_{r12} & \dots & \tilde{t}_{r1n} \\ \tilde{t}_{r21} & \tilde{t}_{r22} & \dots & \tilde{t}_{r2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{t}_{rm1} & \tilde{t}_{rm2} & \dots & \tilde{t}_{rmn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{n}_{11} \otimes \tilde{t}_{p11} & \tilde{n}_{12} \otimes \tilde{t}_{p12} & \dots & \tilde{n}_{1n} \otimes \tilde{t}_{p1n} \\ \tilde{n}_{21} \otimes \tilde{t}_{p21} & \tilde{n}_{22} \otimes \tilde{t}_{p22} & \dots & \tilde{n}_{2n} \otimes \tilde{t}_{p2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \tilde{n}_{m1} \otimes \tilde{t}_{p_{m1}} & \tilde{n}_{m2} \otimes \tilde{t}_{p_{m2}} & \dots & \tilde{n}_{mn} \otimes \tilde{t}_{p_{mn}} \end{pmatrix}. \quad (25)$$

步骤 7 计算理论评价矩阵与实际评价矩阵的间隙. 用 \tilde{T}_{r_A} 减去 \tilde{T}_{P_A} , 得到间隙矩阵 \tilde{G} . 利用式(26)计算间隙矩阵的元素.

$$g_{ij} = t_{pij} - t_{rij}. \quad (26)$$

步骤 8 排序. 对每个备选方案中每个指标下的间隙值求和, 并使用式(27)得到指标函数的最终值. 然后, 将指标函数按升序排列, 最后, 对方案进行排序.

$$Q_i = \sum_{j=1}^n g_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (27)$$

显然, 理论评价矩阵是该理想最优方案的各指标值都取得最优值, 如果实际评价矩阵的备选方案距离理论评价矩阵越近, 有理由认为这个备选方案更好. 因此, 排名最好的备选方案相对于每个指标应该最小的间隙值.

4 案例分析

4.1 应用

通过求解文献[13]中的一个著名的例子, 来说明该方法的应用.

4.1.1 构建问题

在汽车行业生产设备的过程中, 主要潜在的故障

模式分别为不合格材料(FM1)、错误模具(FM2)、错误程序(FM3)、过多的循环时间(FM4)、错误的过程(FM5)、损坏的货物(FM6)、错误的零件(FM7)和错误的表格(FM8)。高层管理人员聘请了3位专家(用DM1, DM2和DM3表示)参与决策, 专家对风险因素(S, O, D)通过两两比较来给出判断矩阵, 然后使用IFAHP来

计算风险因素的权值。随后, 专家给出每种故障模式在不同风险因素下的语言评价, 采用改进的模糊MAIRCA对故障模式进行排序, 最后得到最重要的关键故障模式。专家对风险因素通过两两比较打分给出的判断矩阵如表1所示, 专家对每种故障模式在不同风险因素下的语言评价如表2所示。

表 1 风险因素的语言评价^[13]

Table 1 Linguistic evaluation of risk factors [13]

	严重性(S)			发生性(O)			检测性(D)		
	DM1	DM2	DM3	DM1	DM2	DM3	DM1	DM2	DM3
S	E	E	E	FS	FS	VS	SS	SS	SS
O	—	—	—	E	E	E	SS	FW	E
D	—	—	—	—	—	—	E	E	E

表 2 故障模式的语言评价^[13]

Table 2 Linguistic evaluation of failure modes [13]

故障模式	严重性(S)			发生性(O)			检测性(D)		
	DM1	DM2	DM3	DM1	DM2	DM3	DM1	DM2	DM3
FM1	F	F	MP	F	MG	G	G	MG	G
FM2	P	MP	MP	VG	G	VG	MP	MP	P
FM3	MP	P	MP	VG	G	G	VP	MP	P
FM4	MP	F	MP	F	MG	MG	G	MG	G
FM5	F	F	MP	MG	MG	G	G	VG	G
FM6	MG	MG	F	MG	G	MG	MP	MP	F
FM7	P	MP	VP	VG	VG	VG	VP	MP	P
FM8	VP	VP	P	VP	VP	VP	VP	VP	VP

4.1.2 计算风险因素的权重

通过语言评价与直觉模糊对应表^[39](表3)查表, 将表1中专家两两比较比较矩阵 R^k 转换为直觉模糊判断矩阵 \bar{R} (表4), 如表1中第1个单元格的元素“E”通过语言评价与直觉模糊对应表可知其代表的直觉模糊数为(0.5, 0.3, 0.2)。

表 3 语言评价与直觉模糊数对应表^[39]

Table 3 Corresponding table of linguistic evaluation and intuitive fuzzy numbers [39]

语言评价语	直觉模糊数
极端重要(AS)	(0.90, 0.10, 0.00)
很重要(VS)	(0.80, 0.15, 0.05)
相当重要(FS)	(0.70, 0.20, 0.10)
较重要(SS)	(0.60, 0.25, 0.15)
同等重要(E)	(0.50, 0.30, 0.20)
较不重要(SW)	(0.40, 0.45, 0.15)
不重要(FW)	(0.30, 0.60, 0.10)
很不重要(VW)	(0.20, 0.75, 0.05)
极端不重要(AW)	(0.10, 0.90, 0.00)

表 4 风险因素的直觉模糊判断矩阵

Table 4 Intuitive fuzzy judgment matrix of risk factors

	严重性(S)	发生性(O)	检测性(D)
DM1			
S	(0.5, 0.3, 0.2)	(0.7, 0.2, 0.1)	(0.6, 0.25, 0.15)
O	(0.3, 0.6, 0.1)	(0.5, 0.3, 0.2)	(0.6, 0.25, 0.15)
D	(0.4, 0.45, 0.15)	(0.4, 0.45, 0.15)	(0.5, 0.3, 0.2)
DM2			
S	(0.5, 0.3, 0.2)	(0.7, 0.2, 0.1)	(0.6, 0.25, 0.15)
O	(0.3, 0.6, 0.1)	(0.5, 0.3, 0.2)	(0.3, 0.6, 0.1)
D	(0.4, 0.45, 0.15)	(0.7, 0.2, 0.1)	(0.5, 0.3, 0.2)
DM3			
S	(0.5, 0.3, 0.2)	(0.8, 0.15, 0.05)	(0.6, 0.25, 0.15)
O	(0.2, 0.75, 0.01)	(0.5, 0.3, 0.2)	(0.5, 0.3, 0.2)
D	(0.4, 0.45, 0.15)	(0.5, 0.3, 0.2)	(0.5, 0.3, 0.2)

首先, 将表4中直觉模糊判断矩阵 \bar{R} 的元素代入式(5)–(6)中, 得到一致性模糊判断矩阵 \bar{R} ; 然后, 将直觉模糊判断矩阵 \bar{R} 和一致性直觉模糊判断矩阵 \bar{R} 的元素代入式(8)中计算距离测度分别为 $d(\bar{R}_1, R_1) = 0.3778 > 0.1$, $d(\bar{R}_2, R_2) = 0.2136 > 0.1$, $d(\bar{R}_3,$

$R_3) = 0.4 > 0.1$ 均不满足要求,需对其进行修正.

从 $\sigma = 0.01$ 开始选取,将直觉模糊判断矩阵 R 元素代入式(9)–(10)进行迭代计算,得到满足一致性要求的直觉模糊判断矩阵.然后,将满足要求的直觉判断矩阵元素代入式(11)得到3位专家打分下的指标权重 $W = (\omega_j)_n$,并通过模糊转换函数(式(12))将其转换为单数权值 $W = \begin{pmatrix} 0.316 & 0.344 & 0.340 \\ 0.317 & 0.331 & 0.352 \\ 0.323 & 0.333 & 0.345 \end{pmatrix}$.又将满

足要求的直觉模糊判断矩阵元素代入式(13)可得专家 k 对指标 i 判断矩阵的直觉模糊熵 E_i^k ,接着将上一步得到的指标初始权重与直觉模糊熵 E_i^k 代入式(14)可以得到3位专家此时的权重系数 $\lambda = (0.3096, 0.3296, 0.3608)$.

最后,将对指标打分时专家权重系数与指标初始权重做矢量积运算,得到最终的指标权重 $\omega^* = \lambda W = (0.3228, 0.3326, 0.3447)$.

4.1.3 计算FMAIRCA中专家权重

通过语言评价与模糊对应表(表5)查表,将表2中专家对故障模式的初始语言决策矩阵 D_L 转换为初始

模糊决策矩阵 D (表6),如表2中第1个单元格的元素“F”通过语言评价与模糊对应表可知其代表的模糊数为(3, 5, 7).

表5 语言评价与模糊数对应表^[13]

Table 5 Corresponding table of linguistic evaluation and fuzzy numbers [13]

语言评价语	模糊数	语言评价语	模糊数
非常差(VP)	(0, 0, 1)	较好(MG)	(5, 7, 9)
很差(P)	(0, 1, 3)	很好(G)	(7, 9, 10)
较差(MP)	(1, 3, 5)	非常好(VG)	(9, 10, 10)
同等好(F)	(3, 5, 7)		

首先,计算得到两两专家之间的距离 d (式15),并将结果代入式(16)得到两两专家在相同指标下的决策意见一致度.然后,将决策意见一致度代入式(17)可得专家 k 与其他两位专家决策意见的平均一致度.最后,将专家 k 与其他两位专家决策意见的平均一致度代入式(18)可得专家 k 在不同风险因素下的权重,如表7所示.

表6 初始模糊决策矩阵

Table 6 Initial fuzzy decision matrix

故障模式	严重性(S)			发生性(O)			检测性(D)		
	DM1	DM2	DM3	DM1	DM2	DM3	DM1	DM2	DM3
FM1	(3,5,7)	(3,5,7)	(1,3,5)	(3,5,7)	(5,7,9)	(7,9,10)	(7,9,10)	(5,7,9)	(7,9,10)
FM2	(0,1,3)	(1,3,5)	(1,3,5)	(9,10,10)	(7,9,10)	(9,10,10)	(1,3,5)	(1,3,5)	(0,1,3)
FM3	(1,3,5)	(0,1,3)	(1,3,5)	(9,10,10)	(7,9,10)	(7,9,10)	(0,0,1)	(1,3,5)	(0,1,3)
FM4	(1,3,5)	(3,5,7)	(1,3,5)	(3,5,7)	(5,7,9)	(5,7,9)	(7,9,10)	(5,7,9)	(7,9,10)
FM5	(3,5,7)	(3,5,7)	(1,3,5)	(5,7,9)	(5,7,9)	(7,9,10)	(7,9,10)	(9,10,10)	(7,9,10)
FM6	(5,7,9)	(5,7,9)	(3,5,7)	(5,7,9)	(7,9,10)	(5,7,9)	(1,3,5)	(1,3,5)	(3,5,7)
FM7	(0,1,3)	(1,3,5)	(0,0,1)	(9,10,10)	(9,10,10)	(9,10,10)	(0,0,1)	(1,3,5)	(0,1,3)
FM8	(0,0,1)	(0,0,1)	(0,1,3)	(0,0,1)	(0,0,1)	(0,0,1)	(0,0,1)	(0,0,1)	(0,0,1)

表7 不同风险因素下的专家权重

Table 7 Expert weight under different risk factors

	严重性	发生性	检测性
DM1	0.278	0.362	0.293
DM2	0.336	0.315	0.391
DM3	0.386	0.323	0.316

4.1.4 故障模式排序

首先,将第4.1.3节计算得出的专家 k 在不同风险因素下的权重(表7)和初始模糊决策矩阵 D (表6)代入式(21)计算,可得到初始模糊聚合决策矩阵(表8),实现对MAIRCA的改进.

在本文案例中,故障模式的数量为8.因此, $P_{A_i} = \frac{1}{8}$,这意味着每个备选方案都具有相同的偏好.将第4.1.1节使用IFAHP获得的风险因素权重值 ω^* 和备选方案的偏好($P_{A_i} = \frac{1}{8}$)相乘,可得理论评价矩阵 $\tilde{T}_{P_{A_i}}$,如表9所示.

对上述得到的初始模糊聚合决策矩阵 \tilde{D} 元素进行归一化(式(24)),得到模糊归一化决策矩阵 \tilde{N} .然后,对模糊归一化决策矩阵元素去模糊化(式(2)),得到归一化决策矩阵.然后将归一化决策矩阵乘以理论评价矩阵 $\tilde{T}_{P_{A_i}}$ 的元素(表9),得到实际评价矩阵 $\tilde{T}_{T_{A_i}}$,如表10所示.

实际评价矩阵 $\tilde{T}_{T_{A_i}}$ 与减去理论评价矩阵 $\tilde{T}_{P_{A_i}}$,得到

间隙矩阵 \tilde{G} 。然后,对3个风险因素下的间隙值求和得到总的间隙值,并得到其排序,如表11所示。根据表11

的排序结果可知,最关键的失效模式是“错误的过程(FM5)”,应优先处理,其次是FM1,FM4和FM6。

表 8 初始模糊聚合决策矩阵
Table 8 Initial fuzzy aggregation decision matrix

	严重性	发生性	检测性
FM1	(0.743, 1.410, 2.076)	(1.641, 2.307, 2.866)	(2.073, 2.739, 3.203)
FM2	(0.241, 0.815, 1.481)	(2.790, 3.228, 3.333)	(0.228, 0.789, 1.456)
FM3	(0.221, 0.776, 1.443)	(2.575, 3.121, 3.333)	(0.130, 0.496, 1.065)
FM4	(0.557, 1.224, 1.891)	(1.425, 2.092, 2.759)	(2.073, 2.739, 3.203)
FM5	(0.743, 1.410, 2.076)	(1.882, 2.549, 3.108)	(2.594, 3.130, 3.333)
FM6	(1.410, 2.076, 2.743)	(1.875, 2.543, 3.105)	(0.544, 1.211, 1.877)
FM7	(0.112, 0.429, 0.967)	(3.000, 3.333, 3.333)	(0.130, 0.496, 1.065)
FM8	(0.000, 0.129, 0.590)	(0.000, 0.000, 0.333)	(0.000, 0.000, 0.333)

表 9 理论评价矩阵

Table 9 Theoretical evaluation matrix

	严重性	发生性	检测性
FM1	0.040 3	0.041 5	0.043 1
FM2	0.040 3	0.041 5	0.043 1
FM3	0.040 3	0.041 5	0.043 1
FM4	0.040 3	0.041 5	0.043 1
FM5	0.040 3	0.041 5	0.043 1
FM7	0.040 3	0.041 5	0.043 1
FM8	0.040 3	0.041 5	0.043 1

表 10 实际评价矩阵

Table 10 Actual evaluation matrix

	严重性	发生性	检测性
FM1	0.009 0	0.007 6	0.0128
FM2	0.005 3	0.010 5	0.003 8
FM3	0.005 1	0.010 1	0.002 5
FM4	0.007 8	0.007 0	0.012 8
FM5	0.009 0	0.008 4	0.014 6
FM6	0.013 2	0.008 4	0.005 7
FM7	0.003 0	0.010 9	0.002 5
FM8	0.001 2	0.000 2	0.000 3

表 11 采用所提出的方法对故障模型进行排序

Table 11 The proposed method is used to sort the fault

	间隙	排序	间隙	排序	
FM1	0.095 6	2	FM5	0.093 1	1
FM2	0.105 4	5	FM6	0.097 7	4
FM3	0.107 3	6	FM7	0.108 7	7
FM4	0.097 5	3	FM8	0.123 4	8

4.2 分析与讨论

将所得到的结果与传统的计算RPN值以及其他流行的MCDM方法进行了比较,并观察失效模式排名的

变化,结果如表12所示。

表 12 排名比较

Table 12 Ranking comparisons

	RPN	FVIKOR ^[31]	FMAIRCA ^[13]	本文
FM1	2	2	2	2
FM2	5	5	5	5
FM3	7	6	6	6
FM4	3	3	4	3
FM5	1	1	1	1
FM6	4	4	3	4
FM7	6	7	7	7
FM8	8	8	8	8

从表12可以清楚地推导出一些重要的结果.首先,除FM1,FM2和FM8外,RPN和其他3种方法产生的剩余故障模式的风险顺序不一致,这说明RPN模型不能处理FMEA中的不确定性,并假设风险因素具有相同的重要性.相比之下,所提出的方法使用两两比较的模糊语言来处理信息的不确定性,使用IFAHP方法来计算风险因素的权重,并使用改进的FMAIRCA模型对故障模式进行排序,克服了RPN得分通过S, O和D简单相乘带来的缺陷.其次,使用本文提出的方法产生的FM1,FM2,FM3,FM5,FM7和FM8的排序与FVIKOR和文献[13]中的方法获得的排序是一致的.换句话说,根据除RPN外的3种FMEA方法,其中最重要的两种故障模式和最不重要的4种故障模式的排序结果保持不变.最后,采用FVIKOR方法获得的结果与本文提出方法的排序结果一致,尽管与文献[13]中的方法产生了不同的风险优先级顺序,但前两个高风险的因素仍然是FM5和FM1.因此,通过比较分析,验证了本文提出的方法的有效性。

5 结论

本文提出了一种新的故障模式与有效性评估方法,

通过结合直觉FAHP和一种改进的模糊MAIRCA方法来提高传统的FMEA的有效性. 在直觉FAHP的帮助下, 专家可以通过两两比较的判断有效地表示复杂和不确定的风险评估信息. 对于失效模式的排序, 本文提出了一种改进的模糊MAIRCA方法, 并建立衡量某一专家 k 与其他专家决策意见的平均一致度矩阵来客观的计算对故障模式进行排序时专家的权重, 使结果更为合理. 为了验证本文所提出方法的潜力, 考虑了文献[13]中的一个FMEA的基本例子, 使用相同的两两比较矩阵, 并进行了比较分析. 结果表明, 所提出的综合MCDM方法为FMEA的风险评估和排序提供了一种实用、有效的方法.

在给定的案例中, 只包含了3名专家, 可以建立一个来自不同部门组成的专家团队来进行FMEA, 但目前尚不清楚专家的数量和经验如何影响失效模式的最终排名. 因此, 在未来的研究中, 量化专家的背景和经验对风险评估的影响是很有趣的. 除此之外, 其他的风险因素权重计算方法也可以与FMAIRCA相结合来改进决策过程.

参考文献:

- [1] LIU H C. *FMEA Using Uncertainty Theories and MCDM Methods*. Singapore: Springer, 2016.
- [2] GARGAMA H, CHATURVEDI K S. Criticality assessment models for failure mode effects and criticality analysis using fuzzy logic. *IEEE Transactions on Reliability*, 2011, 60(1): 102 – 110.
- [3] LIU H C, LI Z J, SONG W Y, et al. Failure mode and effect analysis using cloud model theory and promethee method. *IEEE Transactions on Reliability*, 2017, 66(4): 1058 – 1072.
- [4] BIAN T, ZHENG H Y, YIN L K, et al. Failure mode and effects analysis based on D numbers and TOPSIS. *Quality and Reliability Engineering International*, 2018, 34(4): 501 – 515.
- [5] TIAN Z P, WANG J Q, ZHANG H Y. An integrated approach for failure mode and effects analysis based on fuzzy best-worst relative entropy and VIKOR methods. *Applied Soft Computing*, 2018, 72: 636 – 646.
- [6] HUANG W C, ZHANG Y. Railway dangerous goods transportation system risk assessment: An approach combining FMEA with pessimistic-optimistic fuzzy information axiom considering acceptable risk coefficient. *IEEE Transactions on Reliability*, 2021, 70(1): 371 – 388.
- [7] KALATHIL J M, RENJITH R V, AUGUSTINE R N. Failure mode effect and criticality analysis using dempster shafer theory and its comparison with fuzzy failure mode effect and criticality analysis: A case study applied to LNG storage facility. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 138: 337 – 348.
- [8] WANG Z, GAO J M, WANG R X, et al. Failure mode and effects analysis by using the house of reliability-based rough vikor approach. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018, 67(1): 230 – 248.
- [9] Commission I E. *Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA): IEC 60812:2006*. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2006.
- [10] LIU H C, CHEN X Q, YOU J X, et al. A new integrated approach for risk evaluation and classification with dynamic expert weights. *IEEE Transactions on Reliability*, 2021, 70(1): 163 – 174.
- [11] GUL M, AK M F. A modified failure modes and effects analysis using interval-valued spherical fuzzy extension of TOPSIS method: Case study in a marble manufacturing facility. *Soft Computing*, 2021, 25(8): 6157 – 6178.
- [12] OUYANG L H, ZHENG W, ZHU Y G, et al. An interval probability based FMEA model for risk assessment: A real-world case. *Quality and Reliability Engineering International*, 2020, 36(1): 125 – 143.
- [13] BORAL S, HOWARD I, CHATURVEDI K S, et al. An integrated approach for fuzzy failure modes and effects analysis using fuzzy AHP and fuzzy MAIRCA. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 108: 104195.
- [14] LIU Z, MOU X, LIU H C, et al. Failure mode and effect analysis based on probabilistic linguistic preference relations and gained and lost dominance score method. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2021, 53(3): 1566 – 1577.
- [15] LIU H C, YOU J X, LI P, et al. Failure mode and effect analysis under uncertainty: An integrated multiple criteria decision making approach. *IEEE Transactions on Reliability*, 2016, 65(3): 1380 – 1390.
- [16] HUANG G Q, XIAO L M, PEDRYCZ W, et al. Failure mode and effect analysis using T-spherical fuzzy maximizing deviation and combined comparison solution methods. *IEEE Transactions on Reliability*, 2022, 72(2): 552 – 573.
- [17] HUANG J, LI Z J, LIU H C. New approach for failure mode and effect analysis using linguistic distribution assessments and TODIM method. *Reliability Engineering and System Safety*, 2017, 167: 302 – 309.
- [18] LIU H C, WANG L E, LI Z W, et al. Improving risk evaluation in FMEA with cloud model and hierarchical TOPSIS method. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, 27(1): 84 – 95.
- [19] LIU H C, LIU L, LIU N. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(2): 828 – 838.
- [20] LIU H C, CHEN X Q, DUAN C Y. Failure mode and effect analysis using multi-criteria decision making methods: A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 135: 881 – 897.
- [21] ASAN U, AYBERK S. Failure mode and effects analysis under uncertainty: A literature review and tutorial. *Intelligent Decision Making in Quality Management*, 2016, 97: 265 – 325.
- [22] ZADEH A L. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338 – 353.
- [23] SAATY W R. The analytic hierarchy process. *Mathematical Modeling*, 1987, 9(3/5): 161 – 176.
- [24] EMROUZNEJAD A, MARRA M. The state of the art development of AHP (1979–2017): A literature review with a social network analysis. *International Journal of Production Research*, 2017, 55(22): 6653 – 6675.
- [25] KUTLU C A, EKMEKCIOĞLU M. Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(1): 61 – 69.
- [26] PANCHAL D, CHATTERJEE P, SHUKLA K P, et al. Integrated fuzzy AHP-CODAS framework for maintenance decision in urea fertilizer industry. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 2017, 51(3): 179 – 196.
- [27] CHATTERJEE P, STEVIĆ Z. A two-phase fuzzy AHP-fuzzy TOPSIS model for supplier evaluation in manufacturing environment. *Operational Research in Engineering Sciences: Theory and Applications*, 2019, 2(1): 71 – 90.
- [28] ZHAO Tao, XIAO Jian. Type-two intuitionistic fuzzy sets. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(9): 1215 – 1222. (赵涛, 肖建. 二型直觉模糊集. 控制理论与应用, 2012, 29(9): 1215 – 1222.)

- [29] REN Honggang, TAN Zhuoying. Interval intuitionistic fuzzy entropy-set pair analysis-ideal decoupling multi-attribute decision model. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(1): 176 – 186.
(任红岗, 谭卓英. 区间直觉模糊熵-集对分析-理想解耦合的多属性决策模型. *控制理论与应用*, 2020, 37(1): 176 – 186.)
- [30] PAMUAR D, VASIN L, LUKOVAC L. Selection of railway level crossings for investing in security equipment using hybrid DEMATEL-MARICA model. *XVI International Scientific-expert Conference on Railways, Railcon*. 2014, DOI: 10.13140/2.1.2707.6807.
- [31] OPRICOVIC S. Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(10): 12983 – 12990.
- [32] PAMUCAR D S, TARLE S P, PAREZANOVIC T. New hybrid multi-criteria decision-making DEMATEL-MAIRCA model: Sustainable selection of a location for the development of multimodal logistics centre. *Economic Research-Ekonomska Istrazivanja*, 2018, 31(1): 1641 – 1665.
- [33] HAMIDREZA H, ZOLFANI H S, BITARAFAN M, et al. The role of facade materials in blast-resistant buildings: An evaluation based on fuzzy delphi and fuzzy EDAS. *Algorithms*, 2019, DOI: 10.3390/a12060119.
- [34] WANG J Q, ZHANG H Y. Multicriteria decision-making approach based on Atanassov's intuitionistic fuzzy sets with incomplete certain information on weight. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2013, 21(3): 510 – 515.
- [35] HE Y D, HE Z, CHEN H Y. Intuitionistic fuzzy interaction Bonferoni means and its application to multiple attribute decision making. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2015, 45(1): 116 – 128.
- [36] XU Z H, LIAO H C. Intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process. *IEEE Transaction on Fuzzy Systems*, 2014, 22(4): 749 – 761.
- [37] PAPAGEORGION E I, IAKOVIDIS D K. Intuitionistic fuzzy cognitive maps. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2013, 21(2): 342 – 354.
- [38] HAN Rendong, XU Guodong. Information supplier selection decision based on intuitionistic fuzzy cross entropy and grey relation. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(7): 1 – 9.
(韩仁东, 徐国东. 基于直觉模糊交叉熵及灰色关联的混合评价信息供应商选择决策. *科学技术与工程*, 2017, 17(7): 1 – 9.)
- [39] ZHANG Shang, WANG Tao, GU Xueping. Synthetic evaluation of power grid operating states based on intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(4): 41 – 49.
(张尚, 王涛, 顾雪平. 基于直觉模糊层次分析法的电网运行状态综合评估. *电力系统自动化*, 2016, 40(4): 41 – 49.)

作者简介:

彭书勤 硕士研究生, 目前研究方向为故障预测与健康管理、故障诊断与容错控制, E-mail: peng_shuqin@163.com;

吕琛 博士, 教授, 目前研究方向为故障诊断、故障预测与健康管理, E-mail: luchen@buaa.edu.cn;

黄大荣 博士, 教授, 目前研究方向为故障诊断及容错控制、可靠性工程、交通信息与控制, E-mail: drhuangjs@ahu.edu.cn;

程玉杰 博士, 副教授, 目前研究方向为研究方向为故障预测与健康管理、机电设备状态检测与智能诊断、性能退化评估与预测, E-mail: yujiecheng.ok@163.com;

赵玲 博士, 教授, 目前研究方向为故障诊断与预测、状态监测, E-mail: zhao.ling@163.com.