

基于区间犹豫模糊 TODIM 的改进风险评估方法



肖承学 郭健

中央财经大学管理科学与工程学院 北京 100081

(frank_xcx@126.com)

摘要 失效模式与影响分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)是一项事前预防的风险分析手段,在实际运用过程中有许多不足。传统 FMEA 方法的应用环境是高度不确定的,运用传统方法进行分析时,最后的结果与实际情况偏差较大。文中基于模糊理论和多属性决策模型,提出了一种区间犹豫模糊 TODIM 的风险排序方法。首先,利用区间犹豫模糊元(Interval-Valued Hesitant Fuzzy Element, IVHFE)构建专家评价矩阵;然后,采用离差最大化法计算风险因子的客观权重,采用专家打分法确定风险因子的主观权重,将两者结合得到综合权重;最后,采用 TODIM 法对失效模式的 O, S, D 进行综合评估。以地铁车门的风险评估为例,验证了所提方法的有效性。

关键词 失效模式与影响分析; 风险排序; 区间犹豫模糊元; 综合权重; TODIM 法

中图分类号 TH122

Improved FMEA Method Based on Interval-Valued Hesitant Fuzzy TODIM

XIAO Cheng-xue and GUO Jian

School of Management Science and Engineering, Central University of Finance and Economics, Beijing 100081, China

Abstract Failure mode and effect analysis (FMEA) is a pre prevention risk analysis method, which has many shortcomings in the practical application. The application environment of the traditional FMEA method is highly uncertain. The final result using the traditional method for analysis deviates greatly from the actual situation. Based on fuzzy theory and multi-attribute decision model, a risk ranking method of interval-valued hesitant fuzzy TODIM is proposed. Firstly, the interval-valued hesitant fuzzy element is used to construct the expert evaluation matrix. Secondly, the objective weights of risk factors are calculated by the maximum deviation method, and the subjective weights of risk factors are determined by expert evaluating method, and the comprehensive weights obtained by combining the two weights. Finally, the O, S and D of failure modes are evaluated by the TODIM method. Taking the risk assessment of subway doors as an example, the effectiveness of the proposed method is verified.

Keywords Failure mode and effect analysis, Risk ranking, Interval-valued hesitant fuzzy element, Comprehensive weight, TODIM method

1 引言

失效模式与影响分析(FMEA)是一种极为重要的风险分析工具,其采用团队讨论的形式,专家根据自身的知识和经验来确定工艺流程中可能发生的失效模式,然后分析各个失效模式发生的频率(Occurrence, O)、严重程度(Severity, S)和监测等级(Detection, D),通过计算 O, S, D 三者的乘积风险优先系数(Risk Priority Number, RPN)来衡量失效模式的风险大小,以便企业采取可能的预防措施,从而减小故障发生的可能性。RPN 值越大,失效模式的风险就越大。

传统的 FMEA 方法通过计算 RPN 值来进行风险评估,其存在 4 点局限^[1-2]: 1) 相乘的计算方式将 O, S, D 三者看作同等重要,忽略了三者之间的相对重要性; 2) 将风险因子评估值表示为精确值,无法体现事物的复杂性、不确定性和人类处理信息时的犹豫模糊性; 3) 单从计算方法上看,乘积的结果不

能取到最大值和最小值之间的全部数值,并且不同的值相乘会得到相同的计算结果,这使得失效模式间的排序变得困难; 4) 在风险评估过程中,未考虑决策者心理行为特征的影响。

为了解决以上缺点,国内外学者做了一些改进研究。Jiang 等将 O, S, D 的特征信息与 Dempster-Shafer 证据理论结合,提出了一种综合评判失效模式风险的方法,该方法既能覆盖风险评估的多样性和不确定性,又能通过数据融合提高 RPN 的可靠性^[3]。Brun 等采用成对比较的方法,考虑了风险因子在 RPN 计算过程中的相对重要性,求得了失效模式的加权 RPN 值,使用马尔可夫链对加权 RPN 值小于 200 的失效模式进行再评估,从长远和稳定的角度考虑失效模式可能的风险分布,但这种方法依赖于对关键参数的语言评价,存在一定的不确定性和主观性^[4]。将 FMEA 与多属性决策方法结合,是改善传统 FMEA 技术缺陷的有效手段, Liu 等采用云层次 TOPSIS 方法进行失效模式风险排序,使用云模型对

FMEA 团队成员的语言信息进行建模,并对层次 TOPSIS 进行扩展,得出了每个失效模式的风险优先级^[5]。Lo 等提出了一种不需要去模糊化的风险排序方法,用离差最大化法确定风险因子的客观权重,然后将可能度的概念应用到灰色关联分析法中,该方法不需要将区间转换为单个值,而是保留了对区间的排序,保留的信息为每个失效模式的 RPN 值提供了概率,以方便决策者进行判断^[6]。这些方法虽然能够在一定程度上弥补传统 FMEA 法的缺陷,但对模糊环境下的风险排序问题还不够简单高效。基于此,很多学者将模糊集理论与 FMEA 方法结合起来进行风险评估。Mirghafoori 等应用直觉模糊 VIKOR 法和熵计算风险因子的三角直觉模糊数对失效模式进行排序^[7]。Liu 等考虑了多个决策者的意见,用离差最大化法求出风险因子的客观权重,用犹豫模糊 TOPSIS 法对失效模式进行排序,计算出各个失效模式的相对贴近系数,根据贴近系数的大小对失效模式进行排序^[8]。Chang 等提出了一种改进的软 FMEA 法,采用有序加权几何算子,集合专家的犹豫模糊语言术语评价集,考虑到潜在失效模式与潜在原因之间的直接和间接关系,采用 DEMATEL 法对失效模式进行排序。该方法在很大程度上弥补了 FMEA 方法的缺陷,但最后的结果仍然可能出现重复^[9]。

虽然以上改进方法能解决传统 FMEA 方法的一些缺点,但在风险评估和确定优先级的过程中,对 FMEA 团队成员的心理行为特征的研究较少。TODIM(葡萄牙语中交互式多属性决策的首字母缩写)方法是一种基于前景理论的行为决策方法^[10]。与其他行为决策方法相比,TODIM 方法的主要优点在于考虑了决策者的心理特征^[11-12]。因此,应用 TODIM 方法对 FMEA 团队成员的心理行为特征进行风险评估是较为合理的。Wang 等提出了一种新型 FMEA 框架,该框架将 TODIM 方法、Choquet 积分和梯形模糊环境下的 Shapley 指数结合,采用梯形模糊数加权算术交互平均算子集结个人风险评估信息,但这种 type-1 型模糊集不足以处理风险评估过程中的内部不确定性,并且计算过程较为复杂^[13]。目前还没有研究应用 TODIM 方法和区间犹豫模糊理论来进行 FMEA 法的风险评估和优先级排序。

基于此,本文提出了一种新的基于区间犹豫模糊环境下的 TODIM 方法进行风险评估。首先,识别待评估对象的失效模式,专家基于区间犹豫模糊集(Interval-Valued Hesitant Fuzzy set,IVHFS)对失效模式的风险因子 O,S,D 进行评估;其次,采用离差最大化法计算风险因子的客观权重,采用专家打分法求出风险因子的主观权重,进而得到综合权重;最后,采用区间犹豫模糊 TODIM 方法对失效模式的严重度、发生频率和难检度进行评估。本文以地铁车门的失效模式风险评估为例,验证了本文方法的有效性,并进行了敏感性分析。

2 预备知识

2.1 区间犹豫模糊集

为了弥补精确值评价的缺点,以更好地体现人类处理信息的犹豫性和模糊性,本文给出了区间犹豫模糊集的概念。

定义 1^[14] 令 X 为一个给定的集合, $D[0,1]$ 表示区间 $[0,1]$ 上所有闭子区间构成的集合。 X 上的区间犹豫模糊集

则表示为 $\tilde{A} = \{\langle x, \tilde{h}_{\tilde{A}}(x) \rangle | x \in X\}$, 其中, $\tilde{h}_{\tilde{A}}(x): X \rightarrow D[0,1]$ 表示元素 x 属于集合 A 的所有可能区间隶属度构成的集合。为了方便,称 $\tilde{h}_{\tilde{A}}(x)$ 为一个区间犹豫模糊元,即 $\tilde{h}_{\tilde{A}}(x) = \{\tilde{\gamma} | \tilde{\gamma} \in \tilde{h}_{\tilde{A}}(x)\}$, $\tilde{\gamma} = [\tilde{\gamma}^L, \tilde{\gamma}^U]$ 是一个区间数, $\tilde{\gamma}^L = \inf \tilde{\gamma}$ 和 $\tilde{\gamma}^U = \sup \tilde{\gamma}$ 分别表示 $\tilde{\gamma}$ 的下界和上界。IVHFE 是 IVHFS 的基本单元,它可以看作是 IVHFS 的一个特例。

例 1 设 $X = \{x_1, x_2\}$ 为一个给定的集合,区间犹豫模糊元 $\tilde{h}_{\tilde{A}}(x_1) = \{[0.2, 0.3], [0.5, 0.6]\}$ 和 $\tilde{h}_{\tilde{A}}(x_2) = \{[0.6, 0.7]\}$ 分别表示对集合 \tilde{A} 中的 $x_i (i=1,2)$ 的隶属度,则称 \tilde{A} 为一个区间犹豫模糊集: $\tilde{A} = \{\langle x_1, \{[0.2, 0.3], [0.5, 0.6]\} \rangle, \langle x_2, \{[0.6, 0.7]\} \rangle\}$ 。

定义 2^[14] 令 \tilde{h}, \tilde{h}_1 和 \tilde{h}_2 为 3 个 IVHFE, IVHFE 的运算法则请见 OSID 码。

2.2 可能度

为了对区间犹豫模糊元中的区间数进行排序,文中引入可能度的概念。

定义 3^[15] 设 $a = [a^L, a^U], b = [b^L, b^U]$ 为两个区间数,则称式(1)为 $a \geq b$ 的可能度。

$$p(a \geq b) = \max \left\{ 1 - \max \left\{ \frac{b^U - a^L}{a^U - a^L + b^U - b^L}, 0 \right\}, 0 \right\} \quad (1)$$

利用式(1)可以对区间犹豫模糊元中的区间数进行排序,步骤如下^[16]:

步骤 1 给定一组区间数 $a_i = [a_i^L, a_i^U], i=1, 2, \dots, n$, 将它们两两比较,求得相应的可能度 $p_{ij} = p(a_i > a_j) (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n)$, 建立可能度矩阵 $\mathbf{P} = (p_{ij})_{n \times n}$;

步骤 2 令 $\lambda_i = \sum_{j=1}^n p_{ij}$, 得到排序向量 $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)^T$;

步骤 3 根据 λ_i 的大小对 $a_i = [a_i^L, a_i^U], i=1, 2, \dots, n$ 进行排序。

2.3 区间犹豫模糊测度函数

为了能采用 TODIM 方法对失效模式进行排序,需要对两个区间犹豫模糊元进行比较。为了更好地比较区间犹豫模糊元的大小,本文采用 Zhang 和 Xu 提出的测度函数。

定义 4^[17] 设 $h = \langle [\gamma_1^L, \gamma_1^U], [\gamma_2^L, \gamma_2^U], \dots, [\gamma_{l(h)}^L, \gamma_{l(h)}^U] \rangle$ 为一区间犹豫模糊元,则区间犹豫模糊测度函数为:

$$Z_{\zeta}(h) = \left[\frac{(\gamma_1^L)^{\zeta} + (\gamma_2^L)^{\zeta} + \dots + (\gamma_{l(h)}^L)^{\zeta}}{l(h)} \right]^{1/\zeta} + \left[\frac{(\gamma_1^U)^{\zeta} + (\gamma_2^U)^{\zeta} + \dots + (\gamma_{l(h)}^U)^{\zeta}}{l(h)} \right]^{1/\zeta} \quad (2)$$

其中, $l(h)$ 表示区间犹豫模糊元 h 中元素的个数; $\zeta (0 < \zeta < 1)$ 为决策者的态度参数,由决策者根据当时的情况给出。

则对于任意两个区间犹豫模糊元 h_1 和 h_2 :

如果 $Z_{\zeta}(h_1) > Z_{\zeta}(h_2)$, 则 $h_1 > h_2$;

如果 $Z_{\zeta}(h_1) = Z_{\zeta}(h_2)$, 则 $h_1 = h_2$ 。

3 基于区间犹豫模糊 TODIM 的风险排序模型

设有 K 个专家根据各自的经验对产品系统或工艺流程进行分析,确定 m 个失效模式,专家采用 IVHFS 的形式对每种失效模式下的 n 个风险因子(即 O,S,D)进行评价,建立专

家评价矩阵并将其规范化,然后利用改进的 TODIM 方法进行决策。

在 TODIM 方法的决策过程中,获得属性的权重至关重要,根据离差最大化法可以计算出风险因子的客观权重。但这种方法忽略了风险因子本身的重要程度,不能充分体现决策者的偏好。而综合权重法既体现了多属性决策方案固有评价信息的客观作用,也充分利用了决策者经验判断的主观能力。因此本文采用离差最大化法计算风险因子的客观权重,采用专家打分法求出风险因子的主观权重,进而得到风险因子的综合权重,由此更全面地体现出风险因子的相对重要程度。

根据综合相对权重,采用区间犹豫模糊 TODIM 方法对失效模式的风险进行优先级排序,具体步骤如下。

步骤 1 来自各个领域的专家组成风险评估团队。

步骤 2 专家团队发掘所有潜在的失效模式及其产生的原因。

步骤 3 构建专家评价矩阵。决策矩阵 $D = [x_{ij}]_{m \times n}$ 是由决策者以区间犹豫模糊元的形式给出的。然后,将矩阵规范为 D' :

$$D' = [h_{ij}]_{m \times n} = \begin{cases} x_{ij} \\ (x_{ij})^c \end{cases} \quad (3)$$

即矩阵中的效益型不变,成本型取补集。

步骤 4 用离差最大化法确定风险因子的客观权重。首先根据式(1)建立可能度矩阵,得到排序向量 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)^T$,然后根据 λ_i 的大小对区间犹豫模糊元中的各个区间数进行排序。

本文采用区间犹豫模糊距离测度来度量失效模式 A_k 在风险因子 C_j 下与其他所有方案之间的偏差值:

$$d(h_1, h_2) = \sqrt{\frac{1}{2 \# h} \sum_{\lambda=1}^{\# h} [(\gamma_1^{\lambda L} - \gamma_2^{\lambda L})^2 + (\gamma_1^{\lambda U} - \gamma_2^{\lambda U})^2]} \quad (4)$$

其中, h_1 和 h_2 是两个区间的犹豫模糊元, $[\gamma_1^{\lambda L}, \gamma_1^{\lambda U}]$ 和 $[\gamma_2^{\lambda L}, \gamma_2^{\lambda U}]$ 分别是 h_1 和 h_2 中第 λ 大的区间数, $\# h$ 表示区间数。当两个区间犹豫模糊元中的区间数不同时,运用乐观原则添加最大值,使得 $\# h_1 = \# h_2$ 。

在此基础上,采用离差最大化法求风险因子 C_j 的客观权重,为了方便起见,令:

$$Y_j = \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^m \sqrt{\frac{1}{2 \# h} \sum_{\lambda=1}^{\# h} [(\gamma_{ij}^{\lambda L} - \gamma_{il}^{\lambda L})^2 + (\gamma_{ij}^{\lambda U} - \gamma_{il}^{\lambda U})^2]} \quad (5)$$

则客观权重为:

$$w_{oj} = \frac{Y_j}{\sum_{j=1}^n Y_j} \quad (6)$$

步骤 5 确定风险因子的主观权重。 K 个专家对 n 个风险因子的重要性进行评价,评价结果取 $[0, 1]$ 中的某个数,分数越大评价就越高,根据专家的研究领域和经验给每个专家分配相应的权重,则主观权重可以表示为:

$$w_{sj} = \sum_{a=1}^K \epsilon_{aj} a_{aj} \quad (7)$$

其中, ϵ_{aj} 表示风险因子 C_j 下专家 E^a 的权重; a_{aj} 表示风险因子 C_j 下专家 E^a 的评价分数。

步骤 6 求得风险因子的综合相对权重。风险因子的综合权重为:

$$w_j = \frac{w_{sj} \cdot w_{oj}}{\sum_{j=1}^n (w_{sj} \cdot w_{oj})} \quad (8)$$

则风险因子 C_j 相对于参照风险因子 C^* 的相对权重为 $w_j' = w_j / w^*$, 其中 $w^* = \max \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 为参照权重, w^* 对应的属性 C^* 为参照风险因子。

步骤 7 计算失效模式的个体感知优势度。根据式(2)计算评价矩阵中各区间犹豫模糊元的测度函数,比较 h_{ij} 和 h_{kj} 的大小。根据 TODIM 的思想,计算对于同一风险因子 C_j , 失效模式 A_i 优于 A_k 的程度,并用 $\delta_j(A_i, A_k)$ 表示。

当 $Z_{\zeta}(h_{ij}) - Z_{\zeta}(h_{kj}) > 0$ 时,

$$\delta_j(A_i, A_k) = \sqrt{\{d(A_i, A_k) \times w_j' / \sum_{j=1}^n w_j'\}} \quad (9)$$

当 $Z_{\zeta}(h_{ij}) - Z_{\zeta}(h_{kj}) < 0$ 时,

$$\delta_j(A_i, A_k) = -\frac{1}{\theta} \sqrt{\{d(A_i, A_k) \times \sum_{j=1}^n w_j' / w_j'\}} \quad (10)$$

当 $Z_{\zeta}(h_{ij}) - Z_{\zeta}(h_{kj}) = 0$ 时,

$$\delta_j(A_i, A_k) = 0 \quad (11)$$

其中, θ 是损失规避系数,当 $\theta > 1$ 时,决策者对损失的风险规避程度较低;当 $\theta < 1$ 时,决策者对损失的风险规避程度较高。

步骤 8 计算失效模式的总体优势度。根据已经求出的每个风险因子下的个体感知优势度,计算各个失效模式的总体优势度:

$$\varphi(A_i, A_k) = \sum_{j=1}^n \delta_j(A_i, A_k) \quad (12)$$

进一步,计算失效模式 A_i 相对其他所有失效模式的总体优势度 $T(A_i)$:

$$T(A_i) = \sum_{k=1}^m \varphi(A_i, A_k) \quad (13)$$

最后,对总体优势度进行规范化:

$$S(A_i) = \frac{T(A_i) - \min\{T(A_i)\}}{\max\{T(A_i)\} - \min\{T(A_i)\}} \quad (14)$$

步骤 9 根据失效模式的总体占优度 $S(A_i)$ 对失效模式的风险进行排序, $S(A_i)$ 值越大,相应的失效模式 A_i 的风险就越大。

4 算例分析

下面以地铁车门的失效模式风险分析为例,验证所提方法的有效性。

FMEA 小组由 4 位专家组成,专家团队在查阅相关统计数据 and 文献并咨询相关技术人员后,共同确定出 4 种主要的失效模式:压轮松动(A_1)、滚轮磨损(A_2)、开关失效(A_3)和螺母破损(A_4)。4 位专家对 4 种失效模式的评价矩阵如表 1 所列。采用式(3)对评价矩阵进行规范化,假设 3 个风险因子都是效益型的,然后运用乐观原则使区间犹豫模糊元长度相同,根据式(1)建立可能度矩阵,对区间犹豫模糊元中的区间数按从小到大的顺序排序,得到扩充后的规范化矩阵,如表 2 所列。由式(4)可求得 3 个风险因子下各失效模式间的距离测度,如表 3 所列,然后由式(5)和式(6)计算出 3 个风险因子 O, S, D 的客观权重 $w_{oj} = (0.411, 0.294, 0.295)$ 。

表 1 初始评价矩阵

Table 1 Initial evaluation matrix

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
O	{[0.2,0.3],[0.5,0.6]}	{[0.4,0.7]}	{[0.5,0.6],[0.7,0.8]}	{[0.1,0.3],[0.4,0.5]}
S	{[0.6,0.7]}	{[0.5,0.6]}	{[0.2,0.5],[0.6,0.7]}	{[0.3,0.4],[0.5,0.6]}
D	{[0.4,0.5],[0.7,0.8]}	{[0.3,0.5],[0.6,0.7]}	{[0.4,0.5]}	{[0.3,0.5],[0.8,0.9]}

表 2 扩充后的规范化评价矩阵

Table 2 Extended normalized evaluation matrix

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
O	{[0.2,0.3],[0.5,0.6]}	{[0.4,0.7],[0.4,0.7]}	{[0.5,0.6],[0.7,0.8]}	{[0.1,0.3],[0.4,0.5]}
S	{[0.6,0.7],[0.6,0.7]}	{[0.5,0.6],[0.5,0.6]}	{[0.2,0.5],[0.6,0.7]}	{[0.3,0.4],[0.5,0.6]}
D	{[0.4,0.5],[0.7,0.8]}	{[0.3,0.5],[0.6,0.7]}	{[0.4,0.5],[0.4,0.5]}	{[0.3,0.5],[0.8,0.9]}

表 3 风险因子下各失效模式间的距离测度

Table 3 Distance measure of each failure modes under risk factor

	$d(A_1, A_2)$	$d(A_1, A_3)$	$d(A_1, A_4)$	$d(A_2, A_3)$	$d(A_2, A_4)$	$d(A_3, A_4)$
O	0.235	0.255	0.087	0.173	0.269	0.328
S	0.100	0.224	0.224	0.173	0.141	0.100
D	0.087	0.212	0.087	0.150	0.141	0.287

FMEA 专家团队中的每位专家对风险因子的相对重要性进行打分评价,评价结果如表 4 所列,4 位专家在 O, S, D 上分配的权重相同, E^1, E^2, E^3 和 E^4 的 $\epsilon_\alpha = (0.3, 0.2, 0.25, 0.25)$, 根据式(7)得出各风险因子的主观权重 $w_j = (0.615, 0.605, 0.75)$ 。由式(8)可求得风险因子的综合相对权重向量 $w_j' = (1, 0.7, 0.87)$ 。

表 4 专家对风险因子重要性的评价

Table 4 Importance evaluation of risk factors by experts

	E^1	E^2	E^3	E^4
O	0.7	0.4	0.7	0.6
S	0.5	0.9	0.7	0.4
D	0.8	0.8	0.8	0.6

根据式(2)求得各个风险因子下失效模式的区间犹豫模糊测度,然后由式(9)一式(11)求得各失效模式的感知优势度,结果如表 5—表 7 所列。

表 5 风险因子 O 下的感知优势度矩阵

Table 5 Dominance degree matrix under risk indicator O

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	0.00	-0.78	-0.81	0.18
A ₂	0.30	0.00	-0.67	0.32
A ₃	0.31	0.26	0.00	0.36
A ₄	-0.47	-0.83	-0.92	0.00

表 6 风险因子 S 下的感知优势度矩阵

Table 6 Dominance degree matrix under risk indicator S

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	0.00	0.17	0.25	0.25
A ₂	-0.61	0.00	0.22	0.20
A ₃	-0.91	-0.80	0.00	0.17
A ₄	-0.91	-0.72	-0.61	0.00

表 7 风险因子 D 下的感知优势度矩阵

Table 7 Dominance degree matrix under risk indicator D

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	0.00	0.17	0.27	-0.61
A ₂	-0.61	0.00	0.23	-0.61
A ₃	-0.61	-0.61	0.00	-0.61
A ₄	0.17	0.22	0.31	0.00

基于以上计算,根据表 5—表 7 和式(12),可以求得失效模式的总体优势度,如表 8 所列。

表 8 失效模式的总体优势度矩阵

Table 8 Overall dominance degree matrix of failure modes

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
A ₁	0	-0.44	-0.30	-0.18
A ₂	-0.91	0	-0.23	-0.09
A ₃	-1.20	-1.14	0	-0.08
A ₄	-1.21	-1.33	-1.21	0

最后由式(12)、式(13)得到失效模式的规范化总体优势度和排序,结果如表 9 所列。

表 9 失效模式风险优先排序

Table 9 Risk priority ranking order of failure modes

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
$S(A_i)$	1.00	0.89	0.47	0.00
Rank	1	2	3	4

根据表 9 可得到基于每个失效模式总体优势度的风险优先排序,排序结果的降序表示为 $A_1 > A_2 > A_3 > A_4$, 显然 A_1 (压轮松动)为风险最大的失效模式,在进行地铁车门的保养服务设计时应该重点考虑这类失效模式。

上述模型是一种带参数的决策模型,不同的损失衰退系数 θ 可能影响最终的失效模式风险排序。为了探究 θ 对最终排序结果的影响,本文对参数 θ 进行敏感性分析,对 θ 分别取不同的值,按照同样的方法对失效模式风险进行排序,结果如表 10 所列。从表 10 可看出,损失规避系数 θ 的值从 0.1 变化到 4,失效模式的最终排序结果没有发生变化,也就是说,风险排序结果对参数 θ 并不敏感。这对 FMEA 方法在实际中的应用具有重要意义。

表 10 敏感性分析的结果

Table 10 Result of sensitivity analysis

Value of parameter θ	Rank of failure modes
0.1	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
0.5	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
1	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
2	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
3	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$
4	$A_1 > A_2 > A_3 > A_4$

为了证明所提方法的有效性,本文采用基于最大偏差模型的区间犹豫模糊 TOPSIS 方法^[18]来分析表 2 中的数据,求得失效模式相对于区间犹豫模糊正理想解的改进型贴近度,并根据贴近度对失效模式进行排序,结果如表 11 所列。

表 11 对比方法的风险优先排序结果

Table 11 Risk priority ranking results of comparison method

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
$CI'(A_i)$	-0.140	-0.112	-0.595	-1.611
Rank	2	1	3	4

根据表 11 可得到基于每个失效模式贴近度的风险优先排序为 $A_2 > A_1 > A_3 > A_4$, 因此, 失效模式 A_2 的风险最高, A_4 的风险最低。

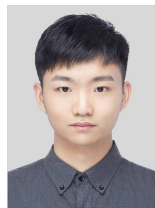
由所提出的改进 FMEA 法和对比方法得出的失效模式风险排序结果基本一致, A_4 都是风险最低的失效模式, 但采用对比方法得出的风险最高的失效模式是 A_2 , 这可能是由于对比方法没有考虑风险因子的主客观权重。除此之外, 所提方法考虑了决策者参考依赖和规避风险的心理特征, 得出的结果在数值上存在明显差别, 可以直观地进行比较, 弥补了传统 FMEA 法计算方式的缺陷, 同时考虑了风险因子的主客观综合权重, 使得风险排序结果更加准确。

结束语 FMEA 方法是一种重要的风险评估方法, 传统的 RPN 值计算方法存在许多不足。本文提出了一种结合区间犹豫模糊和 TODIM 的方法来评价潜在失效模式的风险, 该方法可以为决策者提供更为准确、合理的失效模式风险排序。其优势体现在以下几个方面: 1) 考虑了失效模式的 O, S, D 的主客观综合加权, 使得权重更加合理; 2) 用区间犹豫模糊元来表达专家评估信息, 使分析结果更加贴近现实; 3) 改进 TODIM 决策方法考虑了决策者的风险规避等心理行为特征对结果的影响; 4) 消除了风险评估值重复的情况。

虽然本文研究弥补了传统 FMEA 方法和以往一些研究的不足, 但仍然存在一些局限性: 1) 在一些实际的风险评估问题中, 风险因子之间可能相互关联, 因此在未来的研究中可以采用 Choquet 积分来处理这种风险因子间相互关联的关系^[19]; 2) 所提方法的风险因子客观权重是完全未知的, 但在实际运用过程中, 风险因子的权重信息可能是部分已知的, 在未来的研究中可以建立优化的最大偏差模型来计算这种情况下的风险因子客观权重。

参 考 文 献

- [1] CERTA A, HOPPS F, INGHILLERI R, et al. A Dempster Shafer Theory-based approach to the Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) under epistemic uncertainty: application to the propulsion system of a fishing vessel[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 159(16): 69-79.
- [2] BAYKASOĞLU A, GÖLCÜK İ. Comprehensive fuzzy FMEA model: a case study of ERP implementation risks[J]. Operational Research, 2017, 17(2): 1-32.
- [3] JIANG W, XIE C, ZHUANG M, et al. Failure mode and effects analysis based on a novel fuzzy evidential method[J]. Applied Soft Computing, 2017, 57(8): 1-8.
- [4] BRUN A, SAVINO M M. Assessing risk through composite FMEA with pairwise matrix and Markov chains[J]. International Journal of Quality and Reliability Management, 2018, 35(9): 1709-1733.
- [5] LIU H C, WANG L E, LI Z, et al. Improving risk evaluation in FMEA with cloud model and hierarchical TOPSIS method[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(1): 84-95.
- [6] LO H W, LIOU J J H. A novel multiple-criteria decision-making-based FMEA model for risk assessment[J]. Applied Soft Computing Journal, 2018, 73(12): 684-696.
- [7] MIRGHAFOORI S H, IZADI M R, DAEI A. Analysis of the barriers affecting the quality of electronic services of libraries by VIKOR, FMEA and entropy combined approach in an intuitionistic-fuzzy environment[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2018, 34(4): 2441-2451.
- [8] LIU Y, SHEN G T, ZHAO Z Y. Risk assessment of failure mode and effects analysis (FMEA) under hesitant fuzzy information[J]. INSIGHT, 2019, 61(4): 214-221.
- [9] CHANG K H, WEN T C, CHUNG H Y. Soft failure mode and effects analysis using the OWG operator and hesitant fuzzy linguistic term sets[J]. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 2018, 34(4): 2625-2639.
- [10] GOMES L F A M, LIMA M M P P. TODIM: Basic and application to multicriteria ranking of projects with environmental impacts [J]. Foundations of Computing and Decision Sciences, 1991, 16(3): 113-127.
- [11] ZHANG Y X, XU Z S. Efficiency evaluation of sustainable water management using the HF-TODIM method[J]. International Transactions in Operational Research, 2019, 26(2): 747-764.
- [12] ZHANG Y X, XU Z S, LIAO H C. Water security evaluation based on the TODIM method with probabilistic linguistic term sets[J]. Soft Computing, 2019, 23(15): 6215-6230.
- [13] WANG W, LIU X, QIN J, et al. An extended generalized TODIM for risk evaluation and prioritization of failure modes considering risk indicators interaction[J]. IISE Transactions, 2019, 51(11): 1236-1250.
- [14] CHEN N, XU Z S, XIA M M. Interval-valued hesitant preference relations and their applications to group decision making [J]. Knowledge-Based Systems, 2013, 37(1): 528-540.
- [15] XU Z S, DA Q L. Possibility degree method for ranking interval numbers and its application[J]. Journal of Systems Engineering, 2003, 18(1): 67-70.
- [16] LI D Q, GU Y D. Method for ranking interval numbers based on possibility degree [J]. Journal of Systems Engineering, 2008, 23(2): 243-246.
- [17] ZHANG X L, XU Z S. The TODIM analysis approach based on novel measured functions under hesitant fuzzy environment[J]. Knowledge-Based Systems, 2014, 61(8): 48-58.
- [18] ZHANG X L. Research on multiple attribute decision making methods with hesitant fuzzy information[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [19] GOMES L F A M, MACHADO M A S, DA COSTA F F, et al. Criteria Interactions in Multiple Criteria Decision Aiding: A Choquet Formulation for the TODIM Method [J]. Procedia Computer Science, 2013, 17(2): 324-331.



XIAO Cheng-xue, born in 1998, post-graduate. His main research interests include fuzzy theory and multi-attribute decision-making.



GUO Jian, born in 1977, Ph.D, associate professor. Her main research interests include project risk management and decision analysis.