

基于后悔理论和 COPRAS 的 概率语言 FMEA 风险评估方法

鞠萍华[†], 陈资, 张根保, 李浩

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:针对传统故障模式和影响分析(FMEA)方法存在容易造成专家风险评估信息的丢失、忽略专家有限理性行为和风险指标之间的相对重要性等问题,提出了一种基于后悔理论和复杂比例评估(COPRAS)方法的概率语言 FMEA 风险评估方法.首先采用概率语言术语集(PLTS)描述专家风险评估信息的不确定性和模糊性;然后运用概率语言连乘层次分析法(PL-MAHP)和最大偏差法相结合的综合赋权法获得风险因子综合权重;其次考虑到风险评估过程中专家的心理特征行为,利用后悔理论和 COPRAS 方法确定故障模式风险优先序;最后通过砂轮架故障风险评估案例来验证该方法的适用性和有效性.灵敏度和对比分析结果表明:相比于现有其他方法,该方法得到的故障模式风险排序结果更合理可靠.

关键词:故障模式和影响分析(FMEA);概率语言术语集(PLTS);后悔理论;COPRAS;综合赋权法;风险评估

中图分类号:X931

文献标志码:A

Probabilistic Linguistic FMEA Risk Evaluation Method Based on Regret Theory and COPRAS

JU Pinghua[†], CHEN Zi, ZHANG Genbao, LI Hao

(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: With respect to several drawbacks such as easily causing the loss of experts' risk assessment information, overlooking the failure mode and effect analysis(FMEA) team member's bounded rational behaviors and the relative importance among risk factors in traditional FMEA method. a probabilistic linguistic FMEA risk evaluation method based on regret theory and Complex Proportional Assessment (COPRAS) method was proposed. Firstly, the probabilistic linguistic term sets(PLTS) was used to characterize the ambiguity and uncertainty of experts risk assessment information; Secondly, the risk factor weights were determined by using comprehensive weighting method based on the probabilistic linguistic multiplicative Analytic Hierarchy Process (PL-MAHP) and the maximum deviation method; Thirdly, taking experts' psychological behaviors into account, regret theory and COPRAS were adopted to prioritize failure modes. Finally, an empirical case concerning the risk evaluation of the grinding wheel frame was pre-

* 收稿日期:2019-09-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51835001,51705048), National Natural Science Foundation of China(51835001,51705048); 国家科技重大专项(2018ZX04032-001,2016ZX04004-005), National Science and Technology Major Program of China(2018ZX04032-001, 2016ZX04004-005)

作者简介:鞠萍华(1974—),男,重庆人,重庆大学副教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: jupinghua@163.com

sented to demonstrate the practicality and effectiveness of the proposed method. Results derived from comparative and sensitivity analyses fully show that the risk priority ranking order determined by the proposed FMEA method is shown to be more rational and reliable by comparing with other existing methods.

Key words: failure mode and effect analysis (FMEA); probabilistic linguistic sets (PLTS); regret theory; complex proportional assessment (COPRAS); comprehensive weighting method; risk evaluation

故障模式和影响分析 (Failure Mode and Effect Analysis, FMEA) 方法是一种用于分析系统潜在故障模式原因及其对系统性能影响的可靠性分析和风险管理技术^[1]. 传统 FMEA 方法利用风险优先级数 (risk priority number, RPN) 来确定已识别的故障模式风险优先级顺序. RPN 值由风险因子发生率 (Occurrence, O)、严重性 (Severity, S) 和难测度 (Detection, D) 相乘而得, PRN 值大的故障模式对系统性能和可靠性的风险危害也大, 因此需要被赋予高级别风险优先度并制定相应改进措施^[2]. 虽然传统 FMEA 方法因其简单易操作的特点而被广泛应用于航天、制造和电子等各个领域^[3-5], 但在实际应用中仍存在许多缺陷. 本文主要关注的缺陷有: ①使用量化的精确数值评估故障模式, 无法描述专家评估信息的模糊性和不确定性; ②均等分配风险因子权重, 忽略了风险因子之间的相对重要性; ③RPN 计算公式缺乏全面的科学依据, 易出现故障模式具有相同 RPN 难以判断风险顺序情况; ④专家通常被认为是完全理性的, 忽略专家心理行为在风险评估过程中发挥的重要作用.

在故障模式评估信息方面, 梯形模糊软集^[6]、犹豫模糊集^[7]、区间二型模糊集^[8]、直觉模糊集^[9]和毕达哥拉斯模糊集^[10]等模糊集理论被广泛应用于改进 FMEA 方法的研究中. 然而, 由于决策环境的不确定性和复杂性以及人类认知的固有模糊性, 专家更倾向于用诸如“很低, 低, 一般, 高, 很高”定性的语言术语 (Linguistic Term Set, LTS) 进行风险评估^[11]. 犹豫模糊语言集 (Hesitant Fuzzy Linguistic Term Set, HFLTS)^[12]能表征决策专家在提供评估信息时的犹豫性, 在 HFLTS 基础上, Pang 等^[13]开发的概率语言术语集 (Probabilistic Linguistic Term Sets, PLTS) 不仅允许决策专家使用多个语言术语表达他们的判断, 而且还可以通过不同语言术语增添概率来反映不同程度的偏好, 有效地避免了偏好信息的丢失, 提高了语言信息表达的灵活性, 更加适用于描述专家评估信息的模糊性和不确定性^[14].

为了区分风险因子相对重要性, 文献[15-16, 5]分别应用主观赋权、客观赋权和综合赋权法确定风险因子权重. 其中, 结合了风险因子主客观权重的综合赋权法, 不仅融合了专家主观经验知识, 还充分考虑了客观故障模式评估信息, 并且可以通过设置权重调节系数有效地适用于各种不同现实情况, 故已经成为确定风险因子权重的趋势方法. 另一方面, FMEA 方法中故障模式的风险优先级问题实质上是多属性决策 (Multiple Criteria Decision Making, MCDM) 问题^[17], 因此, 包括灰色关联分析^[18]、逼近于理想解的排序技术 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS)^[5, 19]、复杂比例评估法 (Complex Proportional Assessment, COPRAS)^[20]和偏好顺序结构评估法 (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations, PROMETHEE)^[7]等许多 MCDM 方法已被用于确定故障模式风险优先序. 以上这些方法都是建立在假设决策者行为是完全理性的期望效用理论^[21]基础上, 但已有研究表明, 决策者在实际决策过程中的行为往往是有限理性的, 会受到一些心理因素的影响^[22]. 鉴于此, 一些学者将前景理论运用到风险优先级问题中, 用于反映决策者参数依赖和损失规避理性心理行为, 如 Wang 等^[23]提出了前景理论与 Choquet 积分相结合的 FMEA 风险评估方法, Huang 等^[24]以基于前景理论价值函数为基础的 TODIM 方法确定故障模式风险排序结果. 由 Bell^[25]和 Loomes 等^[26]提出的后悔理论 (regret theory, RT) 侧重于描述决策过程中决策者的后悔规避心理行为, 即决策者在决策过程中会将所考虑方案的结果与其它方案所得到的结果相比较, 从而产生后悔或欣喜的心理预期感受, 并试图避免选择使其感到后悔的方案. 相比于前景理论, 后悔理论具有不需要给定参照点和计算公式中参数少等优势, 然而, 目前很少有学者将后悔理论运用到故障模式风险优先级问题中.

综上所述, 本文提出一种基于后悔理论和 CO-

PRAS 的概率语言 FMEA 风险评估方法. 该方法利用 PLTS 真实刻画了专家提供的评估信息的不确定性和模糊性; 针对专家主观经验知识和故障评估客观信息两方面因素, 运用概率语言连乘层次分析(probabilistic linguistic multiplicative Analytic Hierarchy Process, PL-MAHP) 方法和最大偏差法结合的综合赋权法确定风险因子权重; 通过在后悔理论中引入群体满意度来考虑专家在风险评估过程中心理特征行为, 然后在此基础上构建故障模式感知效用函数, 并将后悔理论与 COPRAS 方法结合确定故障模式风险排序. 最后, 将本文所提的 FMEA 方法应用于砂轮架故障风险评估, 验证了该方法的有效性和适用性.

1 概率语言术语集和后悔理论

1.1 概率语言术语集

定义 1^[13] 设 LTS 为 $S = \{s_\alpha | \alpha = -\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau\}$, 为了描述专家评估时的犹豫和不确定性, 定义一个概率语言术语集 PLTS 为:

$$L(p) = \{L^{(l)}(p^{(l)}) | L^{(l)} \in S, p^{(l)} \geq 0, l=1, 2, \dots, \#L(p), \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)} \leq 1\} \quad (1)$$

式中: $L^{(l)}(p^{(l)})$ 为概率信息为 $p^{(l)}$ 的语言术语 $L^{(l)}$, $\#L(p)$ 为所有 $L(p)$ 中包含的语言术语的个数.

1.1.1 PLTS 的标准化

定义 2^[13] 若 PLTS 中 $\sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)} < 1$, 则概率信息标准化的 PLTS $\dot{L}(p)$ 定义为

$$\dot{L}(p) = \{L^{(l)}(\dot{p}^{(l)}) | l=1, 2, \dots, \#L(p)\} \quad (2)$$

式中: $\dot{p}^{(l)} = p^{(l)} / \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)}$, 令 $\alpha^{(l)}$ 是语言术语 $L^{(l)}$ 的下标, 则 PLTS 内所有元素按照 $\alpha^{(l)} p^{(l)}$ 的值升序排列, 若 PLTS 内含有两个或多个具有相等 $\alpha^{(l)} p^{(l)}$ 值的元素, 则按 $\alpha^{(l)}$ 的值升序排列.

定义 3^[13] 设 $L_1(p) = \{L_1^{(l)}(p_1^{(l)}) | l=1, 2, \dots, \#L_1(p)\}$ 和 $L_2(p) = \{L_2^{(l)}(p_2^{(l)}) | l=1, 2, \dots, \#L_2(p)\}$ 是两个不同的 PLTS, 若 $\#L_1(p) > \#L_2(p)$, 则将 $\#L_1(p) - \#L_2(p)$ 个语言术语添加到 $L_2(p)$ 中, 其中添加的语言术语是 $L_2(p)$ 中最小的语言术语, 且其概率为 0, 使得 $L_1(p)$ 和 $L_2(p)$ 中包含的语言术语的个数相等.

基于定义 2 和定义 3, 可以获得标准化的 PLTS, 被记作 $\bar{L}(p) = \{L^{(l)}(\bar{p}^{(l)}) | l=1, 2, \dots, \#\bar{L}(p)\}$, 其中 $\bar{p}^{(l)} =$

$$p^{(l)} / \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)}.$$

1.1.2 PLTS 的聚合

定义 4^[27] 设 $E = \{e_q | q = 1, 2, \dots, Q\}$ 是一组专家, 其权重向量为 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_Q)^T$, 且满足 $\sum_{q=1}^{\#L(p)} \lambda_q = 1$. 第 q 位专家给出 PLTS $L^q(p) = \{L_\alpha^q(p_\alpha^q) | L_\alpha^q \in S\}$ ($q=1, 2, \dots, Q$), 其中 p_α^q 为语言术语 L_α^q 的概率信息, 则群体 PLTS 为

$$L(p) = \{L_\alpha^{(l)}(p^{(l)}) | L_\alpha^{(l)} \in S, p^{(l)} = \sum_{q=1}^Q v_\alpha^q \lambda_q, l=1, 2, \dots, \#L(p)\} \quad (3)$$

式中: v_α^q 为 $L^q(p)$ 中语言术语 L_α^q 的权重

$$v_\alpha^q = \begin{cases} p_\alpha^q & \text{if } L_\alpha^q \in L^q(p); \\ 0 & \text{if } L_\alpha^q \notin L^q(p) \end{cases} \quad (4)$$

1.1.3 PLTS 之间的比较

定义 5^[27] 设基于 $S = \{s_\alpha | \alpha = -\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau\}$ 的概率语言术语集为 $L(p) = \{L^{(l)}(p^{(l)}) | l=1, 2, \dots, \#L(p)\}$, $\alpha^{(l)}$ 是语言术语 $L^{(l)}$ 的下标, 则其期望值 $E(L(p))$ 和方差值 $\sigma(L(p))$ 分别定义为

$$E(L(p)) = \sum_{l=1}^{\#L(p)} \left(\frac{\alpha^{(l)} + \tau}{2\tau} p^{(l)} \right) / \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)} \quad (5)$$

$$\sigma(L(p)) =$$

$$\left(\sum_{l=1}^{\#L(p)} \left(\frac{\alpha^{(l)} + \tau}{2\tau} - E(L(p)) \right)^2 p^{(l)} \right) / \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)} \quad (6)$$

利用期望值 $E(L(p))$ 和方差值 $\sigma(L(p))$ 构造概率语言术语集 $L_1(p)$ 和 $L_2(p)$ 的大小比较规则为: 若 $E(L_1(p)) > E(L_2(p))$, 则 $L_1(p) > L_2(p)$; 若 $E(L_1(p)) = E(L_2(p))$, 则进行方差值的比较: 若 $\sigma(L_1(p)) > \sigma(L_2(p))$, 则 $L_1(p) < L_2(p)$; 若 $\sigma(L_1(p)) = \sigma(L_2(p))$, 则 $L_1(p) \sim L_2(p)$.

1.1.4 PLTS 的群体满意度

定义 6 设 $L(p) = \{L^{(l)}(p^{(l)}) | l=1, 2, \dots, \#L(p)\}$ 为一个群体 PLTS, 则它的群体满意度为:

$$G(L(p)) = \frac{E(L(p))}{1 + \sigma(L(p))} \quad (7)$$

式中: 期望值 $E(L(p))$ 表示决策者群体意见集中程度, $E(L(p))$ 越小, 内聚力越高; 方差值 $\sigma(L(p))$ 表示决策者群体意见的分歧程度, $\sigma(L(p))$ 越大, 则群体意见分歧大, 群体满意度越低.

1.1.5 PLTS 间的距离

定义 7^[28] 设 LTS 为 $S = \{s_\alpha | \alpha = -\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau\}$, 任意两个不同标准化 PLTS $\bar{L}_1(p) = \{\bar{L}_1^{(l)}(p^{(l)}) | l = 1, 2, \dots, \#\bar{L}_1(p)\}$ 和 $\bar{L}_2(p) = \{\bar{L}_2^{(l)}(p^{(l)}) | l = 1, 2, \dots, \#\bar{L}_2(p)\}$ 之间的距离公式为

d(L1(p), L2(p)) = sqrt(sum_{l=1 to #L1(p)} ((alpha1+tau*p1^(l)) / (2*tau) - (alpha2+tau*p2^(l)) / (2*tau))^2) / #L1(p) (8)

1.2 后悔理论

作为一种重要的行为决策理论, 后悔理论的主要特征是通过将选择方案的结果与其它方案可能获得的结果进行比较, 以衡量决策者的欣喜和后悔程度, 并选择决策者不会后悔的最佳方案^[29].

定义 8^[11-12] 令 x1 和 x2 分别为选择方案 A1 和 A2 所能得到的结果, 那么决策者对方案 A1 的感知效用为

u(x1, x2) = v(x1) + R(v(x1) - v(x2)) (9)

式中: v(·) 为效用函数, 是一个单调递增的凹函数, 满足 v'(·) > 0 和 v''(·) < 0. R(·) 为后悔-欣喜函数, 也是一个单调递增的凹函数, 满足 R(0) = 0, R'(·) > 0 和 R''(·) < 0. 并且, Δv = v(x1) - v(x2) 表示方案 A1 和 A2 的效用值之差, 当 R(Δv) > 0 时, 表示决策者对选择方案 A1 而放弃方案 A2 感到欣喜, 反之, 感到后悔.

本文采用幂函数 v(x) = x^θ 作为属性值的效用函数^[30], 其中, θ 为决策者的风险规避系数, 反映决策者在决策时的风险态度, 0 < θ < 1, 且 θ 越小, 决策者的风险规避程度越高.

根据文献^[25, 31-32], 构造后悔-欣喜函数 R(·) 为 R(x) = 1 - exp(-δ·x) (10)

式中: δ 为决策者的后悔规避系数, δ ∈ [0, +∞] 且 δ 越大, 决策者的后悔规避程度越高. 图 1 为不同系数 δ 对后悔-欣喜函数的影响情况.

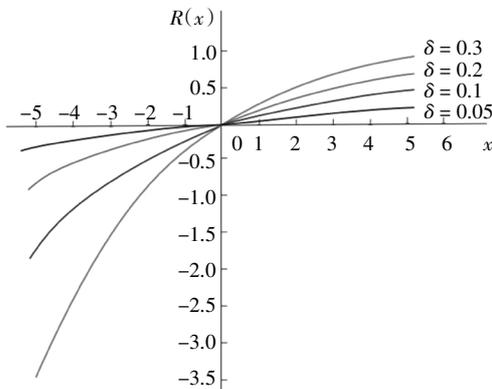


图 1 后悔-欣喜函数 R(x)

Fig.1 The regret-rejoicing function R(x)

最初后悔理论用于两个方案选择问题, 考虑到实际决策过程中通常涉及多个方案, Quiggin^[33] 将其拓展到多个方案的选择问题.

定义 9^[33] 设方案 Ai (i = 1, 2, ..., m) 的结果是 xi (i = 1, 2, ..., m), 则决策者对方案 Ai 的感知效用值为

ui = v(xi) + R(v(xi) - v(x*)) (11)

式中: x* = max_{1 ≤ i ≤ m} {xi}, x* 为理想方案所获得的效用值, R(v(xi) - v(x*)) ≤ 0, 即 R(v(xi) - v(x*)) 表示决策者选择方案 Ai 放弃理想方案时的后悔值, 因此, 决策者对方案的感知效用值包括两部分: 当前方案的效用值和当前方案与理想方案比较的后悔值.

2 基于后悔理论和 COPRAS 的概率语言 FMEA 评估方法

为了解决传统 FMEA 方法的缺陷, 本文提出了一种基于后悔理论和 COPRAS 的概率语言 FMEA 风险评估方法, 该方法主要包括三个阶段: 1) 基于 PLTS 的故障模式风险评估; 2) 利用综合赋权法确定风险因子综合权重; 3) 基于后悔理论和 COPRAS 确定故障模式排序结果. 本文提出的 FMEA 风险评估方法流程图如图 2 所示.

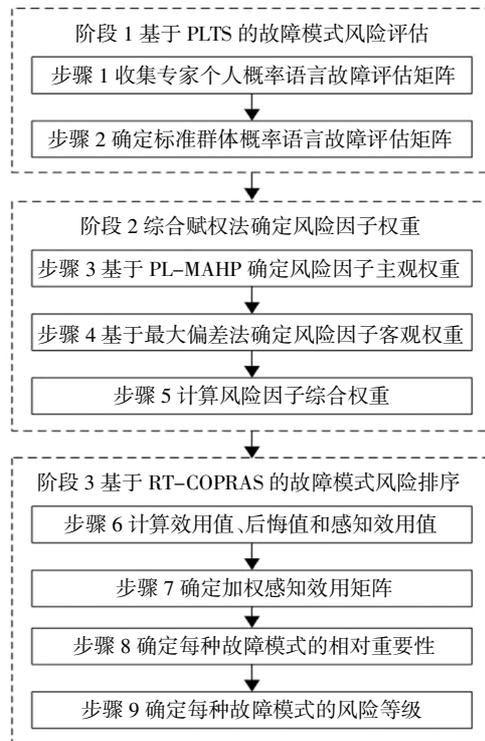


图 2 FMEA 方法框架流程图

Fig.2 Flowchart of the proposed FMEA method

2.1 基于 PLTS 的故障模式风险评估

在故障模式风险评估之前,拥有相关背景知识和专业经验的 FMEA 团队需确定风险评估对象、确定 FMEA 评估范围和识别对象潜在故障模式.

步骤 1 收集专家个人概率语言故障评估矩阵

设 FMEA 团队中有 Q 位来自不同专业领域的专家 $E = \{e_q | q = 1, 2, \dots, Q\}$, 专家 e_q 被分配专家权重 $\lambda_q \geq 0 (q = 1, 2, \dots, Q)$ 且满足 $\sum_{q=1}^Q \lambda_q = 1$, 用来反映其在风险评估过程中的相对重要性. 设 $R^q = [L_{ij}^q(p)]_{m \times n}$ 为第 q 位专家提供的概率语言故障评估矩阵, 其中 $L_{ij}^q(p)$ 为专家 E_q 对关于风险因子 $RF_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 下故障模式 $FM_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 的风险评估值.

步骤 2 确定标准群体概率语言故障评估矩阵

根据式(3)(4)聚集各个专家概率语言故障评估矩阵 $R^q = [L_{ij}^q(p)]_{m \times n}$ 得到群体概率语言故障评估矩阵 $R = [L_{ij}(p)]_{m \times n}$, 然后基于定义 2 和定义 3, 对专家群体概率语言故障评估矩阵 R 进行标准化处理得标准群体概率语言故障评估矩阵 $\bar{R} = [\bar{L}_{ij}(p)]_{m \times n}$.

2.2 综合赋权法确定风险因子权重

风险因子权重在故障模式风险优先级排序中起重要作用, 直接影响最终故障模式风险排序. 本文提供了一种 PL-MAHP 和最大偏差法相结合的综合赋权法用于确定风险因子权重, 从主观和客观两个角度全面反映风险因子的真实信息.

步骤 3 基于 PL-MAHP 确定风险因子主观权重

连乘层次分析法(MAHP)是一种基于属性成对比较矩阵求取属性主观权重的方法^[34], 相比于 AHP, MAHP 最大的特点是具有传递特性, 不需要对比较矩阵进行一致性检验^[35]. 传统 MAHP 使用量化数值来表示两个属性之间的相对重要性, 导致无法真实准确地反映专家判断信息, 考虑到 PLTS 是表征专家判断的有效工具, 文献[27]将 MAHP 拓展到概率语言环境中以确定主观权重.

步骤 3.1 确定专家群体概率语言偏好矩阵

对于风险因子集合 $(RF_1, RF_2, \dots, RF_n)$, 专家 E_q 给出个人概率语言偏好矩阵 $PD^q = (L_{jt}^q(P))_{m \times n} (j, t = 1, 2, \dots, n, q = 1, 2, \dots, Q)$, 其中 $L_{jt}^q(P) = \{L_{jt}^{q(l)}(P^{q(l)}) | 1, 2, \dots, \#L_{jt}^q(P)\}$ 是一个基于 $S = \{s_\alpha | \alpha = -\tau, \dots, -1, 0, 1, \dots, \tau\}$ 的 PLTS, 表示专家 E_q 将风险因子 RF_j 与风险因子 RF_t 比较得到的相对重要性评估, 并满足以下特性:

$$P_{jt}^{q(l)} = P_{tj}^{q(l)}, L_{jt}^{q(l)} = \text{neg}(L_{tj}^{q(l)}), L_{jj}^{(q)}(P) = \{S_0(1)\}, \#L_{jt}^{(q)}(P) = \#L_{jt}^{(q)}(p)$$

通过式(3)(4)聚集 PD^q 得到专家群体概率语言偏好矩阵 $PD = (L_{jt}(P))_{m \times n}$.

步骤 3.2 计算风险因子主观权重

基于 MAHP, 群体偏好矩阵 $PD = (L_{jt}(P))_{m \times n}$ 中 $L_{jt}(P)$ 与风险因子 RF_j 和风险因子 RF_t 权重关系为 $\tilde{w}_j / \tilde{w}_t = \exp(-\ln \sqrt{2} \times (\sum_{l=1}^{\#L(p)} \alpha^{(l)} p^{(l)} / \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(l)}))$, 满足条件 $\prod_{j=1}^n \tilde{w}_j = 1$, 使用对数最小二乘估计得到风险因子 RF_j 权重 \tilde{w}_j :

$$\tilde{w}_j = \exp\left(\frac{\ln \sqrt{2}}{n} \times \sum_{l=1}^n \left(\sum_{i=1}^{\#L(p)} \alpha^{(i)} p^{(i)} / \sum_{l=1}^{\#L(p)} p^{(i)}\right)\right) \quad (12)$$

归一化处理得到风险因子 RF_j 主观权重 w_j^s

$$w_j^s = \tilde{w}_j / \sum_{j=1}^n \tilde{w}_j, j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

步骤 4 基于最大偏差法确定风险因子客观权重

最大偏差法的基本思想是如果在某一风险因子下所有故障模式的故障评估信息具有明显差异, 那么该风险因子在故障模式风险优先级排序中起重要作用, 需要被赋予更大的权重. 反之, 则该风险因子被赋予更小的权重^[36]. 令风险因子 RF_j 的客观权重集合为 $w_j^o = \{w_1^o, w_2^o, \dots, w_n^o\}$, 基于最大偏差法构建以下风险因子 RF_j 客观权重优化模型:

$$\begin{cases} \text{Max} d(w_j^o) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{q=1, q \neq i}^m d(L_{ij}(p), L_{iq}(p)) w_j^o \\ w_j^o \geq 0, \sum_{j=1}^n (w_j^o)^2 = 1, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (14)$$

式中: $d(L_{ij}(p), L_{iq}(p))$ 为 $L_{ij}(p)$ 和 $L_{iq}(p)$ 之间的距离, $d(w_j^o)$ 为关于所有风险因子的所有故障模式之间的偏差度.

利用拉格朗日函数求解式(14), 并对最优风险因子客观权重作归一化处理得到:

$$w_j^o = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{q=1, q \neq i}^m d(L_{ij}(p), L_{iq}(p))}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{q=1, q \neq i}^m d(L_{ij}(p), L_{iq}(p)) w_j^o} \quad (15)$$

步骤 5 计算风险因子综合权重

综合 PL-MAHP 和最大偏差法导出的主观和客观权重,风险因子 RF_j 的综合权重可以计算为

$$w_j = \gamma w_j^s + (1 - \gamma) w_j^o \quad (16)$$

式中: γ 为主观权重系数,反映专家主观判断在风险因子权重中占有的比例,在区间 $[0,1]$ 中变化.

2.3 基于 RT-COPRAS 的故障模式优先级排序

专家的心理行为特征是影响风险评估的重要因素,后悔理论通过引入风险规避参数和后悔规避参数,能够在风险评估过程中灵活反映专家风险规避的风险态度和后悔规避的心理行为,得到的风险排序结果更符合专家的感知,更贴近现实情况. COPRAS 方法是 Zavadskas 等^[37]提出的一种可有效处理 MCDM 问题的工具,其优点在于计算简便,能清楚反映替代方案相比于其它方案的更好与更差程度,并保证排序结果合理可靠.本文提出一种基于 RT-COPRAS 的集成 MCDM 方法,通过结合后悔理论和 COPRAS 的优点,以更好地确定 FMEA 中故障模式的风险优先级.

步骤 6 计算效用值、后悔值和感知效用值

根据群体满意度和后悔理论,计算关于风险因子 $RF_j(j=1,2,\dots,n)$ 下故障模式 $FM_i(i=1,2,\dots,m)$ 的风险评估值 $L_{ij}(p)$ 的效用值:

$$v_{ij} = \left(\frac{E(L_{ij}(p))}{2} \right)^\theta \quad (17)$$

式中: θ 为决策者的风险规避系数.

令 $v_j^* = \max_{1 \leq i \leq m} \{v_{ij}\}$, v_j^* 表示理想点的效用值,则相对于理想点,关于风险因子 $RF_j(j=1,2,\dots,n)$ 下故障模式 $FM_i(i=1,2,\dots,m)$ 的风险评估值 $L_{ij}(p)$ 的后悔值为

$$r_{ij} = 1 - \exp(-\delta \cdot (v_{ij} - v_j^*)) \quad (18)$$

式中: δ 为决策者的后悔规避系数.

基于定义 9,计算关于风险因子 $RF_j(j=1,2,\dots,n)$ 下故障模式 $FM_i(i=1,2,\dots,m)$ 的风险评估值 $L_{ij}(p)$ 的感知效用值为

$$u_{ij} = v_{ij} + r_{ij} \quad (19)$$

步骤 7 确定加权感知效用矩阵

加权感知效用矩阵表示为

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} \bar{u}_{11} & \bar{u}_{1j} & \cdots & \bar{u}_{1n} \\ \bar{u}_{21} & \bar{u}_{22} & \cdots & \bar{u}_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \bar{u}_{m1} & \bar{u}_{m2} & \cdots & \bar{u}_{mn} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中: $\bar{u}_{ij} = w_j \cdot u_{ij}$.

步骤 8 确定每种故障模式的相对重要性

由于 FMEA 问题中所有风险因子都可以被确定为效益指标,即风险因子值越大,故障模式风险越高,故每种故障模式相对重要性 Q_i 为

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \bar{u}_{ij}, i=1,2,\dots,m \quad (21)$$

所有故障模式优先级顺序可根据 Q_i 确定,相对重要性最高的故障模式被认定为最高风险故障模式,应赋予最高级别风险优先度和制定相应改进措施.

步骤 9 确定每种故障模式风险等级

每种故障模式的风险等级 N_i 为

$$N_i = \frac{Q_i}{Q_{\max}} \times 100\%, i=1,2,\dots,m \quad (22)$$

式中: $Q_{\max} = \max_{1 \leq i \leq m} \{Q_i\}$,故障模式的风险等级表示为从 0% 到 100% 的百分比.

3 案例分析

3.1 砂轮架故障风险评估

砂轮架作为磨齿机中极为关键的两大部件之一,不仅承载着砂轮主轴的高速转动,而且提供磨削过程中砂轮的轴向进给运动.本文选择国产某型号磨齿机中砂轮架为故障风险评估对象,首先,FMEA 团队专家依据砂轮架功能结构特点和实践经验识别出 6 个潜在的较高风险故障模式:电主轴启动困难(FM_1)、主轴振动(FM_2)、主轴无动作(FM_3)、皮带松动(FM_4)、砂轮碰撞(FM_5)、砂轮修整器无法自动下落(FM_6).

步骤 1 FMEA 团队由 3 位专家 $E_q (q=1,2,3)$ 组成,其中包括一位砂轮架设计工程师 E_1 ,一位砂轮架制造质量监督员 E_2 和一位数控机床可靠性领域的教授 E_3 .由于 3 位专家具有不同专业背景和专业知识,他们在风险评估过程中被赋予不同专家权重 $\lambda=(0.25,0.4,0.35)$.专家使用语言术语集 $S_1 = \{s_{-3}: \text{很低}, s_{-2}: \text{低}, s_{-1}: \text{稍低}, s_0: \text{中等}, s_1: \text{稍高}, s_2: \text{高}, s_3: \text{很高}\}$ 来评估故障模式,并将收集到的 3 位专家对 6 个潜在的较高风险故障模式的评估信息汇总于表 1 中.

表 1 专家概率语言故障评估信息

Tab.1 Probabilistic linguistic evaluation information of failure modes from experts

E_1	O	S	D
FM ₁	{s ₋₁ (0.1), s ₀ (0.9)}	{s ₂ (0.85), s ₃ (0.15)}	{s ₋₁ (0.7), s ₀ (0.3)}
FM ₂	{s ₁ (0.9), s ₂ (0.1)}	{s ₁ (0.7), s ₂ (0.3)}	{s ₋₁ (0.8), s ₀ (0.2)}
FM ₃	{s ₁ (0.85), s ₂ (0.15)}	{s ₂ (0.1), s ₃ (0.9)}	{s ₋₁ (0.1), s ₀ (0.9)}
FM ₄	{s ₀ (0.8), s ₁ (0.2)}	{s ₂ (0.25), s ₃ (0.75)}	{s ₋₁ (0.2), s ₀ (0.8)}
FM ₅	{s ₋₁ (0.7), s ₀ (0.3)}	{s ₀ (0.85), s ₁ (0.15)}	{s ₀ (0.2), s ₁ (0.8)}
FM ₆	{s ₋₁ (0.3), s ₀ (0.7)}	{s ₂ (0.8), s ₃ (0.2)}	{s ₋₂ (0.8), s ₋₁ (0.2)}
E_2	O	S	D
FM ₁	{s ₋₁ (0.8), s ₀ (0.2)}	{s ₂ (0.7), s ₃ (0.3)}	{s ₋₁ (0.2), s ₀ (0.8)}
FM ₂	{s ₂ (0.7), s ₃ (0.3)}	{s ₁ (0.85), s ₂ (0.15)}	{s ₀ (0.7), s ₁ (0.3)}
FM ₃	{s ₁ (0.1), s ₂ (0.9)}	{s ₁ (0.15), s ₂ (0.85)}	{s ₀ (1)}
FM ₄	{s ₁ (1)}	{s ₂ (0.8), s ₃ (0.2)}	{s ₋₁ (0.7), s ₀ (0.3)}
FM ₅	{s ₋₂ (1)}	{s ₁ (0.9), s ₂ (0.1)}	{s ₀ (0.3), s ₁ (0.7)}
FM ₆	{s ₋₁ (0.85), s ₀ (0.15)}	{s ₂ (0.9), s ₃ (0.1)}	{s ₋₂ (0.7), s ₋₁ (0.3)}
E_3	O	S	D
FM ₁	{s ₋₁ (1)}	{s ₁ (0.9), s ₂ (0.1)}	{s ₋₁ (0.15), s ₀ (0.85)}
FM ₂	{s ₁ (0.9), s ₂ (0.1)}	{s ₁ (0.1), s ₂ (0.9)}	{s ₀ (0.75), s ₁ (0.25)}
FM ₃	{s ₀ (0.25), s ₁ (0.75)}	{s ₂ (0.8), s ₃ (0.2)}	{s ₋₁ (0.75), s ₀ (0.25)}
FM ₄	{s ₁ (0.3), s ₂ (0.7)}	{s ₁ (1)}	{s ₋₂ (0.9), s ₋₁ (0.1)}
FM ₅	{s ₋₂ (0.8), s ₋₁ (0.2)}	{s ₀ (0.1), s ₁ (0.9)}	{s ₋₁ (0.25), s ₀ (0.75)}
FM ₆	{s ₋₁ (0.3), s ₀ (0.7)}	{s ₂ (0.2), s ₃ (0.8)}	{s ₋₃ (1)}

$$PD = \begin{bmatrix} s_0(1) & s_{-2}(0.105), s_{-1}(0.69), s_0(0.205) & s_0(0.12), s_1(0.62), s_2(0.26) \\ s_0(0.205), s_1(0.69), s_2(0.105) & s_0(1) & s_1(0.19), s_2(0.65), s_3(0.16) \\ s_{-2}(0.26), s_{-1}(0.62), s_0(0.12) & s_{-3}(0.16), s_{-2}(0.65), s_{-1}(0.19) & s_0(1) \end{bmatrix}$$

表 2 标准群体概率语言评估矩阵

Tab.2 The normalized group probabilistic linguistic evaluation matrix

	O	S	D
FM ₁	{s ₋₁ (0), s ₋₁ (0.695), s ₀ (0.305)}	{s ₁ (0.315), s ₃ (0.158), s ₂ (0.527)}	{s ₋₁ (0), s ₋₁ (0.548), s ₀ (0.452)}
FM ₂	{s ₃ (0.120), s ₁ (0.540), s ₂ (0.340)}	{s ₁ (0), s ₁ (0.550), s ₂ (0.450)}	{s ₋₁ (0), s ₋₁ (0.287), s ₀ (0.713)}
FM ₃	{s ₀ (0.088), s ₁ (0.515), s ₂ (0.397)}	{s ₂ (0), s ₃ (0.370), s ₂ (0.630)}	{s ₋₁ (0.200), s ₀ (0.593), s ₁ (0.207)}
FM ₄	{s ₀ (0.200), s ₂ (0.245), s ₁ (0.555)}	{s ₁ (0.350), s ₂ (0.383), s ₃ (0.267)}	{s ₋₂ (0.315), s ₋₁ (0.365), s ₀ (0.320)}
FM ₅	{s ₋₂ (0.680), s ₋₁ (0.245), s ₀ (0.075)}	{s ₀ (0.248), s ₂ (0.040), s ₁ (0.712)}	{s ₋₁ (0.088), s ₀ (0.432), s ₁ (0.480)}
FM ₆	{s ₋₁ (0), s ₋₁ (0.620), s ₀ (0.380)}	{s ₁ (0.060), s ₃ (0.295), s ₂ (0.645)}	{s ₋₃ (0.630), s ₋₂ (0.345), s ₋₁ (0.025)}

表 3 风险评估值的效用值、后悔值和感知效用值

Tab.3 Utility values, regret values and perceived utility values of the risk assessment value

故障模式	O			S			D		
	v_{i1}	r_{i1}	u_{i1}	v_{i2}	r_{i2}	u_{i2}	v_{i3}	r_{i3}	u_{i3}
FM ₁	0.381 1	-0.105 7	0.275 5	0.754 5	-0.028 2	0.726 3	0.424 3	-0.039 6	0.384 7
FM ₂	0.715 9	0.000 0	0.715 9	0.716 7	-0.039 9	0.676 8	0.466 4	-0.026 5	0.440 0
FM ₃	0.685 1	-0.009 3	0.675 9	0.847 3	0.000 0	0.847 3	0.498 2	-0.016 7	0.481 5
FM ₄	0.644 3	-0.021 7	0.622 6	0.753 7	-0.028 5	0.725 2	0.341 5	-0.065 7	0.275 9
FM ₅	0.253 9	-0.148 7	0.105 2	0.622 9	-0.069 6	0.553 3	0.553 6	0.000 0	0.553 6
FM ₆	0.413 9	-0.094 8	0.319 0	0.821 3	-0.007 8	0.813 5	0.084 6	-0.151 1	-0.066 5

步骤 2 结合专家权重 $\lambda=(0.25,0.4,0.35)$,根据式(3)(4)聚集 3 位专家个人概率语言故障评估矩阵 $R^q(q=1,2,3)$,并基于定义 2 和 3 标准化处理得标准群体概率语言故障评估矩阵 \bar{R} ,如表 2 所示。

步骤 3 专家使用语言术语集 $K = \{k_{-3}: \text{很不重要}, k_{-2}: \text{不重要}, k_{-1}: \text{稍不重要}, k_0: \text{一样重要}, k_1: \text{稍重要}, k_2: \text{重要}, k_3: \text{很重要}\}$ 对风险因子进行偏好比较,通过式(3)(4)聚集 PD^q 得到专家群体概率语言偏好矩阵,然后通过式(12)(13)可以计算得到风险因子主观权重为 $w_j^s = (0.309\ 5, 0.455\ 7, 0.234\ 8)$ 。

步骤 4 利用式(15),计算得到风险因子客观权重为 $w_j^o = (0.319\ 4, 0.381\ 4, 0.299\ 2)$ 。

步骤 5 通过式(16),其中主观权重系数 γ 设为 0.5,得到综合权重 $w_j = (0.314\ 4, 0.418\ 6, 0.270\ 0)$ 。

步骤 6 通过式(17)~(19),计算所有故障模式风险评估值的效用值、后悔值和感知效用值,计算结果如表 3 所示,其中,参照文献[32],取风险规避系数 $\theta = 0.88$,后悔规避系数 $\delta = 0.3$ 。

步骤 7 结合风险因子权重 $w_j = (0.3144, 0.4186, 0.2700)$, 得到加权感知效用矩阵为

$$\bar{U} = \begin{bmatrix} 0.0867 & 0.3040 & 0.1027 \\ 0.2252 & 0.2832 & 0.1174 \\ 0.2126 & 0.3546 & 0.1285 \\ 0.1959 & 0.3035 & 0.0736 \\ 0.0331 & 0.2315 & 0.1477 \\ 0.1004 & 0.3404 & -0.0177 \end{bmatrix}$$

步骤 8.9 利用式(21)(22), 计算所有故障模式的相对重要性和风险等级, 如表 4 所示. 由表 4 可知, 故障模式风险排序为 $FM_3 > FM_2 > FM_4 > FM_1 > FM_6 > FM_5$, 其中, FM_3 作为风险最高故障模式, 应赋予最高级别风险优先度并制定相应改进措施, FM_2 风险次之, 最低风险故障模式为 FM_5 .

表 4 故障模式风险优先级排序

Tab.4 Risk priority ranking for failure modes

	Q_i	N_i	排序
FM_1	0.493 3	0.709 1	4
FM_2	0.625 9	0.899 6	2
FM_3	0.695 7	1.000 0	1
FM_4	0.573 0	0.823 6	3
FM_5	0.412 4	0.592 8	6
FM_6	0.423 1	0.608 1	5

3.2 灵敏度分析

3.2.1 主观权重系数 γ 灵敏度分析

风险因子的综合权重很大程度上取决于主观权重系数 γ , 且 γ 是在 $[0, 1]$ 中变化的调整参数, 在本文案例中设置为 0.5. 为验证 γ 对故障模式风险排序结果的影响, 取 γ 在不同值的情况时 6 种故障模式的风险排序结果如图 3 所示.

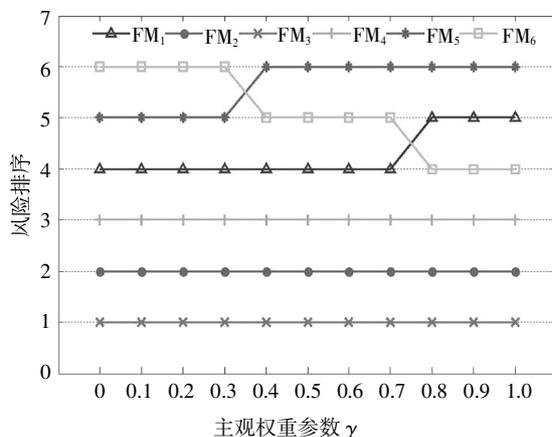


图 3 参数 γ 的灵敏度分析结果

Fig.3 Results of sensitivity analysis on parameter γ

从图中可以清楚地看出, 故障模式 FM_3 、 FM_2 和 FM_4 的风险排序结果不受参数 γ 的影响, 意味着这三种故障模式在专家主观判断和评估信息客观因素两方面具有相同的重要性, 该结果表明, 该案例运用本文提出的方法得到的风险排序结果具有一定的稳定性; 另一方面, 随着参数 γ 的逐渐增大, 故障模式 FM_6 、 FM_5 和 FM_1 的风险排序都发生了改变, 表明偏主观的风险因素权重对故障模式的风险排序有一定影响. 因此, 在现实的 FMEA 风险评估过程中, 需要根据风险评估实际情况和专家对评估信息确定程度来合理确定适当的 γ 值. 当 FMEA 专家团队对风险因子权重信息不太确定或者难以评估时, 应假设 $\gamma \leq 0.5$; 当 FMEA 专家团队对风险因子权重的评估信息较为确定时, 应假设 $\gamma > 0.5$.

3.2.2 后悔规避系数 δ 灵敏度分析

后悔规避系数反映专家的后悔规避心理行为, 在风险规避系数 $\theta = 0.88$ 情况下, 为了研究后悔规避系数 δ 对故障模式风险排序结果的影响, 对参数 δ 进行灵敏度分析. 表 5 显示了使用不同参数 δ 的故障模式风险排序结果. 由表 5 可知, 所有故障模式的相对重要性 Q_i 随着参数 δ 的增加而逐渐减小, 当 $\delta = 0.1$ 时, FM_5 的风险排序大于 FM_6 , 但随着参数 δ 的增加, Q_5 的下降程度大于 Q_6 , 导致 FM_5 的风险排序落后于 FM_6 , 这种现象表明专家的后悔规避心理行为通过后悔规避参数 δ 影响了最终故障模式风险排序结果. 在实际的 FMEA 问题中, 可以通过实验研究, 问卷调查等方法确定 FMEA 专家团队的后悔规避程度, 后悔规避程度越高, 则选取参数 δ 越大.

3.3 对比分析

为验证本文提出方法的合理性和有效性, 将本文提出的概率语言环境下 RT-COPRAS 方法与传统 FMEA 方法、文献[38]提出的犹豫模糊语言环境下基于后悔理论的决策方法和文献[24]提出的一种结合前景理论和 TODIM 方法的风险评估方法作对比分析. 为了方便比较, 文献[38]和文献[24]的方法都沿用本文风险因子综合权重, 并且文献[24]的方法同样采用 PLTS 评估故障风险信息. 将 4 种方法得出的故障模式风险排序结果汇总于表 6 中.

根据表 6 中的结果, 可以看出本文所提 FMEA 方法相对于其他方法的优越性.

表 5 不同参数 δ 的故障模式风险排序结果

Tab.5 Risk ranking of failure modes with different values of parameter δ

故障模式	$\delta = 0.1$		$\delta = 0.3$		$\delta = 0.5$		$\delta = 0.7$		$\delta = 0.9$	
	Q_i	排序								
FM ₁	0.533 7	4	0.493 3	4	0.456 4	4	0.414 8	4	0.371 0	4
FM ₂	0.645 1	2	0.625 9	2	0.612 5	2	0.595 7	2	0.578 4	2
FM ₃	0.704 1	1	0.695 7	1	0.694 1	1	0.689 0	1	0.683 8	1
FM ₄	0.599 6	3	0.573 0	3	0.549 5	3	0.523 3	3	0.496 3	3
FM ₅	0.473 2	5	0.412 4	6	0.360 8	6	0.300 9	6	0.236 4	6
FM ₆	0.467 9	6	0.423 1	5	0.367 9	5	0.308 9	5	0.245 0	5

表 6 不同方法故障模式风险排序比较

Tab.6 Comparison results of failure modes by different ranking method

故障模式	传统 FMEA 方法					文献[38]的方法		文献[24]的方法		本文提出的方法	
	O	S	D	RPN	排序	u_i	排序	ξ_i	排序	Q_i	排序
FM ₁	9	4	3	108	4	0.663 4	3	0.425 4	4	0.493 3	4
FM ₂	8	8	5	320	2	0.721 0	2	0.764 2	2	0.625 9	2
FM ₃	8	6	9	432	1	0.734 5	1	1.000 0	1	0.695 7	1
FM ₄	6	7	6	252	3	0.613 0	4	0.724 3	3	0.573 0	3
FM ₅	4	3	9	108	4	0.356 4	6	0.243 2	5	0.412 4	6
FM ₆	4	9	2	72	6	0.431 2	5	0.000 0	6	0.423 1	5

首先, 本文提出的方法得到故障模式排序与传统 FMEA 方法之间差距较为明显, 例如, 在传统 FMEA 方法故障模式风险排序结果中, FM₁ 和 FM₅ 具有相同 RPN, 导致无法通过 RPN 值区分这两种故障模式风险优先级, 然而本文提出的方法能有效区分这两种故障模式风险差异, 确定故障模式 FM₁ 风险优先级高于 FM₅, 此外, 故障模式 FM₅ 和 FM₆ 在风险因子 O 下具有相同的值, 其中 FM₅ 的 D 值较高, 而 FM₆ 的 S 值较高, 传统 FMEA 方法根据两者 RPN 确定 FM₅ 风险优先级高于 FM₆, 但是, 实际应用中, 风险因子 S 的权重高于 D , 所以, 应该赋予 FM₆ 更高的风险优先顺序, 本文所提的方法就清楚地考虑了在风险评估过程中风险因子权重对故障模式风险排序结果的影响。

其次, 使用文献[38]的方法确定的故障模式 FM₁ 和 FM₄ 风险排序结果与本文所提的方法有所不同,

导致这种差异的主要原因是: 相对于文献[38]的方法采用 HFLTS 表征故障评估信息, 本文所使用的 PLTS 更能准确真实地反映专家评估信息的模糊性和不确定性, 避免信息的丢失, 使得最终风险等级结果更具精确性。

最后, 本文提出的方法得到的故障模式排序与文献[24]的方法得到的故障模式排序相比, 则在 FM₅ 和 FM₆ 的排序上产生变化, 尽管文献[24]的方法使用以前景理论为基础的 TODIM 来确定故障模式风险优先序, 考虑了专家参照依赖和损失规避的心理行为, 但是前景理论要求专家给出参考点, 计算公式中涉及许多参数, 使风险评估过程变得更复杂, 而后悔理论不仅能反映专家风险规避的风险态度和后悔规避等心理行为对风险排序结果的影响, 还能避免人为给定参考点引起的主观随机性, 计算公式中参数较少, 计算过程较为简单。

4 结 论

本文提出了一种基于后悔理论和 COPRAS 的概率语言 FMEA 风险评估方法,以克服传统 FMEA 方法的缺陷,提高其科学性和有效性.该方法具有以下优势:

1) 运用 PLTS 评估故障模式风险,不仅适应了专家的语言表达习惯,而且能解决专家评估信息丢失的问题,并真实地刻画了专家评估信息的模糊性和不确定性.

2) 运用 PL-MAHP 和最大偏差法结合的综合赋权法区分风险因子的相对重要性,克服了主观赋权法或客观赋权法单方面的缺陷,并且通过设置主观权重系数调整主客观权重比例,可以有效地适用于各种不同现实情况.

3) 基于 RT-COPRAS 对故障模式进行风险排序,不仅避免了 FMEA 方法中出现故障模式具有相同 RPN 值难以判断风险排序的情况,而且能更客观地反映专家风险规避的风险态度和后悔规避等心理行为对风险排序结果的影响,使得风险排序结果更贴近实际情况.

敏感度和对比分析结果表明:本文所提出的方法得到的故障模式风险排序结果比现有其它方法得到的排序结果更精确和可靠,但是仍有一些问题需要在未来研究加以解决,首先,针对故障模式之间存在的直接或间接影响,可以利用模糊认知图或复杂网络等方法将故障模式之间影响关系引入风险评估过程中;其次,为了简化本文提出的风险评估方法计算任务,可以开发一种计算机辅助决策支持系统减少风险评估师的工作量;此外,该方法可用于应对其它更复杂的风险分析问题,以进一步验证其适用性和有效性.

参考文献

- [1] BOWLES J B, PELÁEZ C E. Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis [J]. Reliability Engineering & System Safety, 1995, 50(2): 203—213.
- [2] 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 [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2018, 67(1): 230—248.
- [3] ZHOU X, TANG Y. Modeling and fusing the uncertainty of FMEA experts using an entropy-like measure with an application in fault evaluation of aircraft turbine rotor blades [J]. Entropy, 2018, 20(11): 864.
- [4] LO H W, LIOU J J H, HUANG C N, *et al.* A novel failure mode and effect analysis model for machine tool risk analysis [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2019, 183: 173—183.
- [5] MIRGHAFUORI 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 & Fuzzy Systems, 2018, 34(4): 2441—2451.
- [6] WANG Z L, YOU J X, LIU H C, *et al.* Failure mode and effect analysis using soft set theory and COPRAS method [J]. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2017, 10(1): 1002—1015.
- [7] 耿秀丽, 邱华清. 基于犹豫模糊 PROMETHEE II 的设计方案群决策方法 [J]. 计算机应用研究, 2018, 35(10): 3020—3024.
GENG X L, QIU H Q. Group decision-making method of design concept based on hesitant fuzzy PROMETHEE II [J]. Application Research of Computers, 2018, 35(10): 3020—3024. (In Chinese)
- [8] AKYUZ E, CELIK E. A quantitative risk analysis by using interval type-2 fuzzy FMEA approach: the case of oil spill [J]. Maritime Policy & Management, 2018, 45(8): 979—994.
- [9] 王睿, 朱江洪, 李延来. 基于直觉模糊 MULTIMOORA 的改进 FMEA 风险评估方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(2): 290—301.
WANG R, ZHU J H, LI Y L. Improved FMEA method for risk evaluation based on intuitionistic fuzzy MULTIMOORA [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(2): 290—301. (In Chinese)
- [10] KARASAN A, ILBAHAR E, CEBI S, *et al.* A new risk assessment approach: Safety and Critical Effect Analysis (SCEA) and its extension with Pythagorean fuzzy sets [J]. Safety Science, 2018, 108: 173—187.
- [11] 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.
- [12] RODRIGUEZ R M, MARTINEZ L, HERRERA F. Hesitant fuzzy linguistic term sets for decision making [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2012, 20(1): 109—119.
- [13] PANG Q, WANG H, XU Z S. Probabilistic linguistic term sets in multi-attribute group decision making [J]. Information Sciences, 2016, 369: 128—143.
- [14] WU X L, LIAO H C. An approach to quality function deployment based on probabilistic linguistic term sets and ORESTE method for multi-expert multi-criteria decision making [J]. Information Fusion, 2018, 43: 13—26.

- [15] LIU H C, FAN X J, LI P, *et al.* Evaluating the risk of failure modes with extended MULTIMOORA method under fuzzy environment [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2014, 34: 168—177.
- [16] 杜哈恒, 彭翀. 基于模糊 TOPSIS 的 FMEA 方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2016, 42(2): 368—374.
DU H H, PENG C. Failure mode and effects analysis method based on fuzzy TOPSIS [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(2): 368—374. (In Chinese)
- [17] LIU H C, LI Z J, SONG W Y, *et al.* Failure mode and effect analysis using cloud model theory and PROMETHEE method [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2017, 66(4): 1058—1072.
- [18] LIU H C, WANG L E, YOU X Y, *et al.* Failure mode and effect analysis with extended grey relational analysis method in cloud setting [J]. *Total Quality Management and Business Excellence*, 2017, 30(7): 745—767.
- [19] 王睿, 李延来, 朱江洪, 等. 考虑专家共识的改进 FMEA 风险评估方法 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(6): 1058—1067.
WANG R, LI Y L, ZHU J H, *et al.* An improved FMEA method considering expert consensus [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(6): 1058—1067. (In Chinese)
- [20] NIE R X, TIAN Z P, WANG X K, *et al.* Risk evaluation by FMEA of supercritical water gasification system using multi-granular linguistic distribution assessment [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2018, 162: 185—201.
- [21] NEUMANN J V, MORGENSTERN O. *The theory of games and economic behavior*[M]. Princeton: Princeton University Press, 1944.
- [22] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Prospect theory: an analysis of decision under risk [J]. *Econometrica*, 1979, 47(2): 263—291.
- [23] WANG W Z, LIU X W, QIN Y, *et al.* A risk evaluation and prioritization method for FMEA with prospect theory and Choquet integral [J]. *Safety Science*, 2018, 110: 152—163.
- [24] HUANG J, LI Z J, LIU H C. New approach for failure mode and effect analysis using linguistic distribution assessments and TODIM method [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 167: 302—309.
- [25] BELL D E. Regret in decision making under uncertainty [J]. *Operations Research*, 1982, 30(5): 961—981.
- [26] LOOMES G, SUGDEN R. Regret theory: an alternative theory of rational choice under uncertainty [J]. *The Economic Journal*, 1982, 92(368): 805—824.
- [27] WU X L, LIAO H C, XU Z S, *et al.* Probabilistic linguistic MULTI-MOORA: a multi-criteria decision making method based on the probabilistic linguistic expectation function and the improved borda rule [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2018, 26(6): 3688—3702.
- [28] MAO X B, WU M, DONG J Y, *et al.* A new method for probabilistic linguistic multi-attribute group decision making: application to the selection of financial technologies [J]. *Applied Soft Computing*, 2019, 77: 155—175.
- [29] ZHANG X, LIANG H M, FANG F, *et al.* A method for risky multiple attribute decision making considering regret and rejoicing of the decision maker [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 124: 422—434.
- [30] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty [J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, 5(4): 297—323.
- [31] CHORUS C G. Regret theory-based route choices and traffic equilibria [J]. *Transportmetrica*, 2012, 8(4): 291—305.
- [32] LIANG X, LIU P, LIU Z. Selecting products considering the regret behavior of consumer: a decision support model based on online ratings [J]. *Symmetry*, 2018, 10(5): 178—197.
- [33] QUIGGIN J. Regret theory with general choice sets [J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1994, 8(2): 153—165.
- [34] LOOTSMA F A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART [J]. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 1993, 2(2): 87—110.
- [35] TRIANTAPHYLLOU E. Two new cases of rank reversals when the AHP and some of its additive variants are used that do not occur with the multiplicative AHP [J]. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 2001, 10(1): 11—25.
- [36] WU Z B, CHEN Y H. The maximizing deviation method for group multiple attribute decision making under linguistic environment [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2007, 158(14): 1608—1617.
- [37] ZAVADSKAS E K, KAKLAUSKAS A, SARKA V. The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects [J]. *Technological and Economic Development of Economy*, 1994, 1(3): 131—139.
- [38] LIU X D, WANG Z W, ZHANG S T. A new methodology for hesitant fuzzy emergency decision making with unknown weight information [J]. *Complexity*, 2018, 2018: 1—12.