

基于失效模式与后果分析扩展模型的外包风险分析

尤筱玥¹, 雷星晖¹, 刘虎沉^{1, 2}

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092; 2. 上海大学 管理学院, 上海 200444)

摘要: 失效模式与后果分析(FMEA)是一种重要的质量管理与可靠性分析工具,然而传统模型在实际运用中存在若干缺陷.利用区间二元混合加权距离(ITHWD)测度对传统 FMEA 模型进行改进,利用区间二元语义 FMEA 模型,并以刀具管理业务合同履行模块为例进行失效风险分析.通过传统模型与改进模型结果的比较,发现后者不仅能减少评价信息转换过程中产生的信息失真或损失情况,而且还考虑到了风险因子的主客观权重以及决策者的决策态度,从而提高了最终失效模式优先度排序的准确性、可靠性和灵活性.

关键词: 失效模式与后果分析; 距离测度; 外包; 优先度排序

中图分类号: F27

文献标志码: A

Evaluation of the Risk of Outsourcing Failure Modes Using Interval 2-Tuple Linguistic FMEA Model

YOU Xiaoyue¹, LEI Xinghui¹, LIU Hucheng^{1, 2}

(1. School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Failure mode and effect analysis (FMEA) is an important quality management and reliability assessment tool. However, the conventional model has some weaknesses when applied in actual situations. In this paper, a new risk priority model using interval 2-tuple hybrid weighted distance (ITHWD) measure was proposed to improve the performance of the traditional FMEA. It is shown that the improved model has not only considered the subjective and objective weights of risk factors, but also avoided information distortion and loss. Besides, a case study of tool management was provided to demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: failure mode and effects analysis (FMEA); distance measure; outsourcing; priority ranking

自外包服务概念提出及发展以来,其伴随的各种优势已逐步体现,其中主要包括增强企业核心竞争力、降低经营成本、简化或优化组织结构等^[1].然而,由于对外包业务控制权的降低,其风险评价需尤为得到重视.借助有效、可靠的风险评价手段,能够使企业在决策阶段避免不必要的失误,同时能够提前制定预防和改进方案,降低外包失效带来的损失.

失效模式与后果分析(failure mode and effects analysis, FMEA)是一种重要的质量管理与可靠性分析工具,其被广泛应用于包括航空、汽车、核能、机械、医疗等各种行业^[2].本文对传统 FMEA 模型风险分析的精确度和可靠度进行改进,结合区间二元混合加权距离(interval 2-tuple hybrid weighted distance, ITHWD)测度来计算确定各外包失效模式的风险,减少评价信息转换过程中产生的信息失真或损失情况,明确其互相之间的重要程度,从而有针对性地分析和制定决策,提高外包项目的成功率.

1 FMEA 与相关距离测度

1.1 FMEA 模型

FMEA 起源于 20 世纪 60 年代的航空航天行业,是基于该领域对可靠性和安全性的显著需求而正式设计的分析方法^[3-4].FMEA 既可以用于事先预防阶段,通过分析潜在失效模式及失效原因,采取预防措施,避免缺陷或失效发生;也可以用于事后改进阶段,通过分析已发生的失效模式及其原因,采取改进措施,从而避免缺陷或失效再次发生^[5].该模型采用团队讨论的形式,利用专家小组的专业知识和经验,来全面挖掘系统中潜在的失效模式,评价各失效模式的后果及严重度(severity, S),找出产生失效的原因,估计发生度(occurrence, O),分析现有的过程

收稿日期: 2015-03-21

基金项目: 国家自然科学基金(71402090);中国博士后科学基金(2014M560356);教育部人文社会科学研究规划基金(13YJA630041)

第一作者: 尤筱玥(1991—),女,博士生,主要研究方向为战略管理与财务管理. E-mail: yxyrachel@sina.com

通讯作者: 雷星晖(1963—),男,教授,博士生导师,管理学博士,主要研究方向为战略管理与财务管理. E-mail: leixinghui@tongji.edu.cn

控制措施,确定检测度(detection, D),并通过严重度、发生度和检测度的成绩计算每一个失效模式的风险优先系数(risk priority number, RPN),根据RPN的降序排列确定风险较高的失效模式,并提出相应的预防或改进措施.通常情况下,上述三个风险因子的评价范围均为1~10分,其乘积RPN的值最小为1,最大为1 000.可见,若RPN越高,则认为该失效模式的风险越大,应当优先得到处理.

截至到目前,FMEA模型已广泛应用于各个领域.如,吴迪和王旭^[6]以业务流程优化(business process improvement, BPI)模式为核心思想,从风险管理角度对业务流程进行分析,运用FMEA进行业务流程风险分析与风控,为中小企业优化业务流程、提升服务质量提供借鉴的模式和方法.尤筱玥和黄志明^[7]在构建失效模块层次结构的基础上从质量、数量、时间三方面识别失效模式,并通过算例验证了基于FMEA模型的企业业务外包风险评价的可行性和有效性.付煜茗^[8]在总结和对比FMEA和故障树分析法(fault tree analysis, FTA)的基础上提出了综合分析的流程,并对某三自由度机械手系统进行了可靠性分析,找到了系统的薄弱环节. Silverman和Johnson^[9]则强调,只有正确使用FMEA才能使其发挥真正价值.文中将FMEA应用于对FMEA自身的分析,归纳总结了十项误区并给出若干建议,以指导企业正确使用该模型.

1.2 FMEA模型的缺陷与改进

由于传统FMEA模型的数据来源于FMEA小组成员的集体讨论研究,不同专业背景的决策者评价失效模式风险因子的依据和偏好各不相同.此外,在将定性的语言评价及描述文字转化为定量数据时容易产生信息失真或缺失现象.因此,传统FMEA模型的缺陷受到了很多研究者的关注^[10-13],其中较为重要的有:①没有考虑风险因子严重度、发生度和检测度之间的相对重要性;②不同的风险因子组合有时会计算出相同的RPN值,但实际暗藏的风险可能大不相同;③实际风险分析中,失效模式的风险因子难以用数字精确评价;④计算RPN的公式本身缺乏科学依据并富有争议.

目前已有一些学者提出各种替代FMEA的方法,以解决或改善传统RPN的计算不足,并提高FMEA的风险分析能力,其中包括灰色关联分析(grey relational analysis, GRA)^[14]、逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)^[15]、规则库系统(rule base

system)^[16]、数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)^[17]等.

然而,由于现实生活往往难以用精确的数据来模拟,企业在处理风险和失效分析的过程中常常存在模棱两可或有歧义的信息.为提高分析的准确与可靠性,一些研究者把模糊集理论应用到FMEA过程中.例如, Song等^[18]提出了一种基于模糊TOPSIS和综合权重方法的失效模式评价模型,以提高模糊RPN算法在应对不确定性信息时的精确性. Liu等^[19]则利用模糊语言变量对风险因子及其权重进行评价,提出了一种基于模糊集理论和全乘比例分析多目标优化(multi-objective optimization by ratio analysis plus full multiplicative form, MULTIMOORA)方法的风险排序方法,以提高传统FMEA的有效性.

1.3 ITHWD测度

目前,大部分研究集中于讨论FMEA在运用过程中信息转换的问题,期望通过模糊逻辑来解决实际风险分析的不确定性.但是,由于FMEA的数据来源于专家小组的主观评价,不同专长和背景的成员在评价风险时常常偏好采用不同粒度的语言术语集评价失效模式的风险,而且现实情况的复杂性也会降低信息转换时的精确度.因此,基于精确数的传统FMEA模型不能有效表示专家成员模糊、不确定和多样性的评价信息.

区间二元语义表示模型(interval 2-tuple linguistic representation model)^[18]能够克服上述局限.其优势在于决策者能够根据偏好选择不同粒度的语言术语集评价失效模式;同时,对于每一个失效模式的评价既可以是确定等级也可以是区间等级,并可借助区间二元组来表示和处理专家小组的各种风险评价信息.

另一方面,传统FMEA模型中并未考虑不同风险因子之间的相对权重以及专家小组成员的权重,为此二者赋权能够完善企业在评价风险因子时的侧重点和客观性.此外,风险因子权值的变化会直接影响到失效模式的最终排序.因此,风险因子的权重显得非常重要,其规范与确定应当恰如其分.目前,FMEA中风险因子的权重可以根据主观加权法(如层次分析法(AHP))或者客观加权方法(如DEA法^[21])来确定.但是,两种加权方法各有利弊,为结合两者的优点,在计算FMEA风险因子的权重时有必要将两者结合起来,形成组合赋权法. ITHWD测度是一种基于距离的信息集结算子,能够同时考虑每

个区间二元语义距离的权重及其有效权重. 因此, 可以应用 ITHWD 测度对传统 FMEA 进行改进, 以提高失效模式风险分析的可靠性.

基于上述分析, 本文着重研究基于 ITHWD 测度的改进 FMEA 模型, 即运用 ITHWD 测度来克服风险因子评价范围和权重的单一性, 提高传统 FMEA 模型的精确度.

2 区间二元语义 FMEA 模型

Herrera 和 Martínez^[22]在符号平移概念的基础上首次提出了二元语义表示模型. 此后, Chen 和 Tai^[23]提出广义二元语义模型来处理多粒度语义信息. Zhang^[24]在此定义的基础上又提出了区间二元语义表示模型, 以更精确地表达决策信息. Liu 等^[25]研究总结了二元语义变量及区间二元语义变量的基本概念, 从区间二元加权距离 (interval 2-tuple weighted distance, ITWD) 和区间二元有序加权距离 (interval 2-tuple ordered weighted distance, ITOWD) 两方面, 探讨提出了 ITHWD 测度. 本文运用其研究成果, 即区间二元语义 FMEA 模型, 其中结合了风险因子的主客观权重与决策者态度, 从而更精确地确定失效模式的风险优先度.

对于某风险分析问题, 假设 FMEA 专家小组中有 l 个决策者 $D_k (k=1, 2, \dots, l)$ 需要对 m 个失效模式 $M_i (i=1, 2, \dots, m)$ 关于 n 个风险因子 $F_j (j=1, 2, \dots, n)$ 进行评价. 为反映在风险评价过程中小组成员的相对重要性, 各决策者 D_k 均被赋予权重 $\lambda_k > 0 (k=1, 2, \dots, l)$, 且满足 $\sum_{k=1}^l \lambda_k = 1$. 令 $\mathbf{E}_k = (e_{ij}^{(k)})_{m \times n}$ 为决策者 D_k 的语义评价矩阵, 其中 $e_{ij}^{(k)}$ 表示决策者 D_k 在评价失效模式 M_i 关于风险因子 F_j 给出的语义短语. 令 $w_j^{(k)}$ 为决策者 D_k 给定的风险因子 F_j 的语义权重, 以反映不同风险因子在失效模式风险分析中的相对重要性. 此外, FMEA 的小组成员被允许采用不同粒度 z_k 的语言评价集来表达他们各自的判断.

基于上述假设, 区间二元语义 FMEA 模型的分析过程可通过以下步骤进行:

(1) 将语义评价矩阵 $\mathbf{E}_k = (e_{ij}^{(k)})_{m \times n}$ 转换为区间二元评价矩阵 $\tilde{\mathbf{R}}_k = (\tilde{r}_{ij}^{(k)})_{m \times n} = ([(r_{ij}^{(k)}, 0), (t_{ij}^{(k)}, 0)])$, 其中 $r_{ij}^{(k)}, t_{ij}^{(k)} \in S, S = \{S_i | i=0, 1, 2, \dots, g\}$, 且 $r_{ij}^{(k)} \leq t_{ij}^{(k)}$.

(2) 集结 FMEA 小组决策成员的意见, 构建集

体区间二元评价矩阵 $\tilde{\mathbf{R}} = (\tilde{r}_{ij})_{m \times n}$, 并得到各风险因子的聚合二元权重向量 $\mathbf{w} = [(w_j, \alpha_{wj})]_{1 \times n}$, 其中

$$\begin{aligned} \tilde{r}_{ij} &= [(r_{ij}, \alpha_{ij}), (t_{ij}, \epsilon_{ij})] = \\ &= \left[\left(\sum_{j=1}^n \left(\frac{\lambda_k r_{ij}^{(k)}}{z_k} \right), \alpha_{ij} \right), \left(\sum_{j=1}^n \left(\frac{\lambda_k t_{ij}^{(k)}}{z_k} \right), \epsilon_{ij} \right) \right], \\ & i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1) \\ (w_j, \alpha_{wj}) &= \left(\sum_{k=1}^l (\lambda_k w_j^{(k)}), \alpha_{wj} \right), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2) \end{aligned}$$

(3) 确定风险因子的主客观权重.

基于风险因子的聚合权重 $(w_j, \alpha_{wj}), j=1, 2, \dots, n$, 通过下式的量纲一化方法计算得到影响因子的主客观权重:

$$\bar{w}_j = \frac{\Delta^{-1}(w_j, \alpha_{wj})}{\sum_{j=1}^n \Delta^{-1}(w_j, \alpha_{wj})}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

(4) 确定风险因子的客观权重.

本文运用相似度的概念来确定风险因子的客观权重. 该方法确定的客观权重不仅能随失效模式的变化而调整, 同时还能够减轻不合理或极端评价对集结结果的影响. 风险因子的客观权重可通过以下公式计算得到:

$$\begin{aligned} \omega_{ij} &= y_{ij} / \sum_{j=1}^n y_{ij}, \\ & i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} y_{ij} &= 1 - \frac{\Delta^{-1}d(\tilde{\alpha}_{\sigma(ij)}, \tilde{\mu}_i)}{\sum_{j=1}^n \Delta^{-1}d(\tilde{\alpha}_{\sigma(ij)}, \tilde{\mu}_i)}, \\ & i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mu}_i &= \Delta \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta^{-1}(r_{ij}, \alpha_{ij}), \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta^{-1}(t_{ij}, \epsilon_{ij}) \right), \\ & i = 1, 2, \dots, m \quad (6) \end{aligned}$$

(5) 建立风险因子的参考序列.

在 FMEA 模型中, 风险因子值越小意味着失效模式的风险越低, 因此, 参考序列应当是描述风险因子语言短语的最低水平^[26-27]. 在区间二元语义环境中, 最小二元组 $(s_0, 0)$ 可作为每个风险因子最低风险的参考值, 即风险因子参考序列可确定为

$$\mathbf{A}_0 = (r_{0j})_{1 \times n} = [(s_0, 0), (s_0, 0), \dots, (s_0, 0)] \quad (7)$$

(6) 计算比较序列与参考序列的距离.

在构建集体区间二元评价矩阵 $\tilde{\mathbf{R}} = (\tilde{r}_{ij})_{m \times n}$ 后, 含有 n 个风险因子的比较序列可由 $\tilde{\mathbf{A}}_i = [\tilde{r}_{i1}, \tilde{r}_{i2}, \dots, \tilde{r}_{in}]$, $i=1, 2, \dots, m$ 表示. 然后, 对于每一个失效模式, 其比较序列与参考序列的距离可通过

ITHWD 测度计算得到

$$D_i = f(\tilde{A}_i, A_0) = \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} d^\lambda(\tilde{r}_{\sigma(ij)}, \dot{r}_{\sigma(0j)}) \right)^{1/\lambda} \quad (8)$$

式中, $d(\tilde{r}_{\sigma(ij)}, \dot{r}_{\sigma(0j)})$ 表示第 j 大加权区间二元距离 $d(\tilde{r}_{ij}, \dot{r}_{0j})$; $d(\tilde{r}_{ij}, \dot{r}_{0j}) = n\bar{w}_j d(\tilde{r}_{ij}, r_{0j})$, $j=1, 2, \dots, n$; n 为平衡系数; λ 为满足 $\lambda \in (-\infty, +\infty) - \{0\}$ 的参数.

(7) 确定失效模式风险排序.

根据 FMEA 模型的概念, 比较序列与参考序列的距离越大表明失效模式的风险越高. 由此, 所有失效模式 $M_i (i=1, 2, \dots, m)$ 可根据由 ITHWD 测度计算的 $D_i (1, 2, \dots, m)$ 值的降序确定风险优先度.

3 外包案例应用分析

A 公司于 2005 年注册成立, 是一家中外合资、以生产汽车发动机为主营业务的制造型企业. 其至今拥有包括缸体、缸盖、曲轴和凸轮轴的 4 大机加工生产线, 包括缸盖分装线、短发装配线和长发装配线的 3 条总成分装线, 以及最长的 1 条发动机总装线. 公司管理层在充分研究了国内外汽车行业服务外包的相关经验基础上, 在国内首次大胆地实践了生产性服务全方位的外包, 即将物流管理、设备维修管理、化学品管理、刀具管理、检量具管理等生产性服务外包给国内外著名的外包公司来管理, 成为国内第一家实现非核心业务全面外包的企业.

本文在传统 FMEA 模型应用于合同履行失效模块的研究基础上, 将失效模式再次细化, 具体分析生产性服务中刀具管理业务的合同履行风险, 并用区间二元语义 FMEA 模型进行更精确、更可靠的风险评价和分析.

3.1 模型应用

对于制造型企业来说, 切割、打磨等工序的进行均涉及刀具管理业务, 因此, 刀具的应用对产品质量起到至关重要的作用. A 公司将该业务进行外包, 不仅意味着刀具本身的质量需要进行检验, 还包括业务操作的人员和管理应当得到监督. 因此在进行风险评价时, 需要从刀具和人员两方面进行分析.

首先, A 公司选择合适的人员组建 FMEA 专家小组, 决策成员共 5 人, $D_k (k=1, 2, \dots, 5)$, 其中包括熟知刀具管理的业务人员以及风险评价和外包方面的专家. 专家小组可通过头脑风暴法来寻找和列出初步的失效模式, 并经过讨论或投票筛选出其中

普遍认为较重要的失效模式作为此次风险评价的分析对象. 表 1 为讨论结果, 其列出了 10 项主要的失效模式, $M_i (i=1, 2, \dots, 10)$, 并针对每一失效模式给出其失效原因和失效后果.

表 1 刀具管理业务合同履行失效模式分析

Tab.1 FMEA of the contract performance of tool management

编号	失效模式	失效原因	失效后果
1	刀具易损、易碎或断裂	刀具材料选取不当, 人为失误, 质检存在疏漏	需替换刀具, 生产线流程或中断, 对刀具的需求量增加
2	切削精度不达标	刀具选取不当, 安装不当, 刀具未及时更换, 操作不当	二次加工, 或产品装配时无法契合
3	刀具型号、尺寸等规格与合同要求不符	生产计划与合同不符	无法进行有效加工, 刀具需重新交货, 外包业务时间延长
4	刀具质量参差不齐	工序能力不足, 质检存在疏漏	生产线时常中断, 加工流程不稳定
5	员工技术掌握不达标	人岗不匹配, 业务技术培训不足, 考核指标偏低	工作时易产生失误和低效率, 降低产品质量
6	新刀具规划及优化能力不足	研发不协同, 供应商技术创新能力不足	技术无法及时更新, 产业技术不能与时俱进
7	业务团队分工不均	资源配置未进行优化	工序进度不一致, 流水线缺乏连贯性
8	刀具组装与拆分过程数目不匹配	人为疏忽, 刀具补货不及时	影响均衡生产
9	刀具数量与合同不符	生产计划与库存不协调	库存冗余或生产能力不足
10	交货延迟	合同或合同变更存在缺陷, 违约	影响均衡生产

此次刀具管理业务合同履行的风险因子包括严重度、发生度和检测度. 基于 ITHWD 测度的优势, 专家组成员可选用不同粒度的语言评价集对各失效模式关于上述三个风险因子进行评价: D_1 和 D_5 选用 5 粒度的语言术语集; D_2 和 D_4 选用 7 粒度的语言术语集; D_3 选用 9 粒度的语言术语集. 此外, 风险因子的主观权重将采用 5 粒度语言术语集进行评价. 上述语言术语集分配情况如表 2 所示.

根据给出的失效模式和评价标准, FMEA 小组关于风险因子及其主观权重的评价结果如表 3 和表 4 所示.

由于不同决策者在专业领域的经验与知识的差异, FMEA 专家小组在此次评价过程中所占权重分别为: 0.15, 0.20, 0.30, 0.20 和 0.15. 根据区间二元语义 FMEA 模型, 针对刀具管理业务的合同履行模块的外包风险评价计算步骤如下:

(1)将语义评价矩阵 $E_k = (e_{ij}^{(k)})_{10 \times 3}$ 转换为区间二元评价矩阵 $\tilde{R}_k = (\tilde{r}_{ij}^{(k)})_{10 \times 3}$. 例如, D_1 的失效模式评价结果可转换得到区间二元评价矩阵 \tilde{R}_1 , 如表 5 所示. 此外, 表 4 中给出的风险因子主观权重也可同样转换为二元语义变量, 结果见表 6.

(2)根据失效模式的评价矩阵以及风险因子的聚合权重, 计算并构建集体评价矩阵 $\tilde{R} = (\tilde{r}_{ij})_{10 \times 3}$ 和聚合主观权重向量 w , 结果如表 7 所示.

(3)由量纲一化方法计算公式(3)得到风险因子的主观权重为 $\bar{w} = (0.381, 0.286, 0.333)$.

表 2 语言术语集分配情况

Tab.2 Denotation of linguistic term sets

分类	语言术语集	决策者
A	$a_0 = \text{很低(VL)}, a_1 = \text{低(L)}, a_2 = \text{中等(M)}, a_3 = \text{高(H)}, a_4 = \text{很高(VH)}$	D_1, D_5
B	$b_0 = \text{很低(VL)}, b_1 = \text{低(L)}, b_2 = \text{较低(ML)}, b_3 = \text{中等(M)}, b_4 = \text{较高(MH)}, b_5 = \text{高(H)}, b_6 = \text{很高(VH)}$	D_2, D_4
C	$c_0 = \text{极低(EL)}, c_1 = \text{很低(VL)}, c_2 = \text{低(L)}, c_3 = \text{较低(ML)}, c_4 = \text{中等(M)}, c_5 = \text{较高(MH)}, c_6 = \text{高(H)}, c_7 = \text{很高(VH)}, c_8 = \text{极高(EH)}$	D_3
D	$d_0 = \text{很不重要(VU)}, d_1 = \text{不重要(U)}, d_2 = \text{中等(M)}, d_3 = \text{重要(I)}, d_4 = \text{很重要(VI)}$	D_1, D_2, D_3, D_4, D_5

表 3 失效模式语言评价

Tab.3 Linguistic assessments of ten failure modes

决策者	风险因子	失效模式									
		M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}
D_1	S	H-VH	M	VH	H	M	L	VL-L	H	H	VH
	O	L	H	VL-L	M-H	H-VH	M	H	M	H	H
	D	VL-L	M	VL	H	H	H	VH	L-M	L-M	L-M
D_2	S	H-VH	H	M	M	ML-M	ML	M-MH	ML	M-MH	MH-H
	O	M	M-MH	ML	MH	MH	MH	M	M	M	M
	D	L	M	VL	MH	MH	ML-M	MH	M	M-MH	VL
D_3	S	H-VH	MH-H	M-MH	M	ML-M	M	M	ML-M	M	MH-H
	O	ML	ML-M	L-ML	ML-M	ML	ML-M	ML	ML	ML	M
	D	VL-L	L	VL	L-ML	ML	M-MH	VL-L	VL	EL-VL	VL-L
D_4	S	ML-M	M-MH	ML-M	L-ML	M	MH	M	MH	H	H
	O	L	M	ML	ML	M	M-MH	M	L-ML	VL	M
	D	L	ML	L	L-ML	ML-M	M	ML	L	VL	VL
D_5	S	H	H-VH	M-H	H	H	M	L-M	L	L-M	L
	O	L	L	L	L	M	L	M	M	L	H
	D	VL-L	VL	VL	M-H	M	M	L-M	L	VL	VL

表 4 风险因子主观权重评价

Tab.4 Linguistic assessments of subjective weights of risk factors

风险因子	决策者				
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
S	VI	VI	VI	VI	VI
O	I	M	I	VI	I
D	VI	I	I	VI	VI

表 5 区间二元评价矩阵 \tilde{R}_1

Tab.5 Interval 2-tuple assessment matrix \tilde{R}_1

失效模式	风险因子		
	S	O	D
M_1	$[(a_3, 0), (a_4, 0)]$	$[(a_1, 0), (a_1, 0)]$	$[(a_0, 0), (a_1, 0)]$
M_2	$[(a_2, 0), (a_2, 0)]$	$[(a_3, 0), (a_3, 0)]$	$[(a_2, 0), (a_2, 0)]$
M_3	$[(a_4, 0), (a_4, 0)]$	$[(a_0, 0), (a_1, 0)]$	$[(a_0, 0), (a_0, 0)]$
M_4	$[(a_3, 0), (a_3, 0)]$	$[(a_2, 0), (a_3, 0)]$	$[(a_3, 0), (a_3, 0)]$
M_5	$[(a_2, 0), (a_2, 0)]$	$[(a_3, 0), (a_4, 0)]$	$[(a_3, 0), (a_3, 0)]$
M_6	$[(a_1, 0), (a_1, 0)]$	$[(a_2, 0), (a_2, 0)]$	$[(a_3, 0), (a_3, 0)]$
M_7	$[(a_0, 0), (a_1, 0)]$	$[(a_3, 0), (a_3, 0)]$	$[(a_4, 0), (a_4, 0)]$
M_8	$[(a_3, 0), (a_3, 0)]$	$[(a_2, 0), (a_2, 0)]$	$[(a_1, 0), (a_2, 0)]$
M_9	$[(a_3, 0), (a_3, 0)]$	$[(a_3, 0), (a_3, 0)]$	$[(a_1, 0), (a_2, 0)]$
M_{10}	$[(a_4, 0), (a_4, 0)]$	$[(a_3, 0), (a_3, 0)]$	$[(a_1, 0), (a_2, 0)]$

表 6 二元语义风险因子权重

Tab.6 2-tuple linguistic risk factors weights

风险因子	决策者				
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
S	$(d_4, 0)$	$(d_4, 0)$	$(d_4, 0)$	$(d_4, 0)$	$(d_4, 0)$
O	$(d_3, 0)$	$(d_2, 0)$	$(d_3, 0)$	$(d_4, 0)$	$(d_3, 0)$
D	$(d_4, 0)$	$(d_3, 0)$	$(d_3, 0)$	$(d_4, 0)$	$(d_4, 0)$

表 7 集体评价矩阵和聚合主观权重向量

Tab.7 Collective assessment matrix and aggregated subjective weight vector

失效模式	S	O	D
M_1	$\Delta[0.683, 0.825]$	$\Delta[0.321, 0.321]$	$\Delta[0.104, 0.217]$
M_2	$\Delta[0.642, 0.750]$	$\Delta[0.463, 0.533]$	$\Delta[0.317, 0.317]$
M_3	$\Delta[0.542, 0.650]$	$\Delta[0.246, 0.321]$	$\Delta[0.071, 0.071]$
M_4	$\Delta[0.508, 0.542]$	$\Delta[0.425, 0.500]$	$\Delta[0.429, 0.538]$
M_5	$\Delta[0.467, 0.538]$	$\Delta[0.533, 0.571]$	$\Delta[0.500, 0.533]$
M_6	$\Delta[0.463, 0.463]$	$\Delta[0.458, 0.529]$	$\Delta[0.504, 0.575]$
M_7	$\Delta[0.388, 0.496]$	$\Delta[0.500, 0.500]$	$\Delta[0.425, 0.500]$
M_8	$\Delta[0.463, 0.500]$	$\Delta[0.396, 0.429]$	$\Delta[0.246, 0.283]$
M_9	$\Delta[0.567, 0.638]$	$\Delta[0.363, 0.363]$	$\Delta[0.138, 0.246]$
M_{10}	$\Delta[0.675, 0.746]$	$\Delta[0.575, 0.575]$	$\Delta[0.075, 0.150]$
w	$\Delta(1.000)$	$\Delta(0.750)$	$\Delta(0.875)$

(4)由公式(4)可计算得到各失效模式的风险因

子的客观权重,如表 8 所示.

表 8 失效模式的风险因子客观权重

Tab.8 Objective weights of risk factors of ten failure modes

失效模式	ω_{i1}	ω_{i2}	ω_{i3}
M_1	0.253	0.428	0.319
M_2	0.798	0.428	0.317
M_3	0.251	0.470	0.280
M_4	0.271	0.389	0.340
M_5	0.306	0.422	0.272
M_6	0.284	0.281	0.435
M_7	0.300	0.450	0.250
M_8	0.304	0.446	0.250
M_9	0.259	0.458	0.283
M_{10}	0.328	0.421	0.251

(5)风险因子的参考序列表达了失效模式的理想水平,即风险最低的情况.因此,参考序列可定为 $r_0 = (r_O, r_S, r_D) = [\Delta(0), \Delta(0), \Delta(0)]$.

(6)令 $\lambda = 1$,根据公式(8)计算失效模式比较序列与参考序列的距离,结果如表 9 所示.

表 9 失效模式 ITHWD 计算结果与风险优先度排序

Tab.9 ITHWD results of ten failure modes and risk priority ranking

失效模式	S	O	D	ITHWD	排序
M_1	$\Delta(0.757)$	$\Delta(0.321)$	$\Delta(0.170)$	$\Delta(0.3910)$	8
M_2	$\Delta(0.698)$	$\Delta(0.499)$	$\Delta(0.317)$	$\Delta(0.9196)$	1
M_3	$\Delta(0.598)$	$\Delta(0.286)$	$\Delta(0.071)$	$\Delta(0.3063)$	10
M_4	$\Delta(0.525)$	$\Delta(0.464)$	$\Delta(0.486)$	$\Delta(0.4871)$	4
M_5	$\Delta(0.503)$	$\Delta(0.522)$	$\Delta(0.517)$	$\Delta(0.5230)$	2
M_6	$\Delta(0.463)$	$\Delta(0.495)$	$\Delta(0.541)$	$\Delta(0.4866)$	5
M_7	$\Delta(0.445)$	$\Delta(0.500)$	$\Delta(0.464)$	$\Delta(0.4685)$	6
M_8	$\Delta(0.482)$	$\Delta(0.413)$	$\Delta(0.265)$	$\Delta(0.3915)$	7
M_9	$\Delta(0.603)$	$\Delta(0.363)$	$\Delta(0.199)$	$\Delta(0.3772)$	9
M_{10}	$\Delta(0.711)$	$\Delta(0.575)$	$\Delta(0.119)$	$\Delta(0.5038)$	3

(7)将所有失效模式根据 ITHWD 测度的计算结果降序排列.比较序列与参考序列的距离,越大表示该失效模式的风险优先度越高.

从表 9 中的风险排序可以看出,10 个主要失效模式的优先顺序为 $M_2 \rightarrow M_5 \rightarrow M_{10} \rightarrow M_4 \rightarrow M_6 \rightarrow M_7 \rightarrow M_8 \rightarrow M_1 \rightarrow M_9 \rightarrow M_3$.也就是说,经过 FMEA 决策组的评价, M_2 即刀具的切削精度问题产生的失效风险最大,应当首先对其进行详细分析并制定出预防或改进措施.

3.2 灵敏度分析

在上述案例中, λ 的取值为 1.然而根据定义, λ 满足 $\lambda \in (-\infty, +\infty) - \{0\}$.图 1 给出了 λ 在 $[-10, 10]$ 区间内取值变化产生的不同计算距离结果.可以看出,随着 λ 的变化,各失效模式之间的风险排序也会有所改变.当 $\lambda < 0$ 时, M_5 为风险优先度最高的失

效模式的情况占多数;当 $\lambda > 0$ 时,位列第一的则多为 M_2 ,并且风险明显高于其他失效模式.鉴于 λ 的变化引起的计算结果具有明显差别,因此在风险分析中选取恰当的 λ 值非常重要.也就是说,在运用评价数据和模型计算失效模式的风险之前,决策者应当事先确定 λ 的取值.通常情况下,悲观决策者偏好取较大的 λ 值,这是因为他们更容易在失效模式评价中给予较高的值;反之,越是乐观的决策者,其给定的 λ 值则会越低.若决策者在判断 λ 值时没有明显偏好,则可默认取 $\lambda = 1$.由此,通过 ITHWD 改进的 FMEA 模型,企业能够将决策者的决策态度这一特性纳入考虑,使模型更为精确和完善.

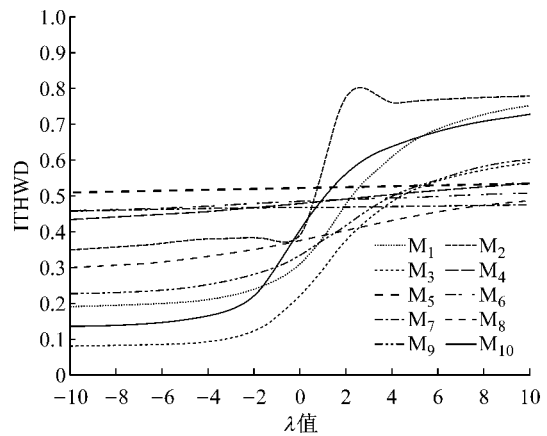


图 1 ITHWD 计算结果($\lambda \in [-10, 10]$)

Fig.1 ITHWD results($\lambda \in [-10, 10]$)

3.3 比较分析

本文除利用改进 FMEA 模型对 10 个失效模式进行风险排序外,同时也应用传统 FMEA 模型计算其 RPN 大小,并在表 10 中列出了两种方法的失效模式排序结果.

表 10 风险优先度排序比较

Tab.10 Comparison of risk priority ranking

失效模式	S	O	D	RPN	RPN 排序	ITHWD 排序
M_1	7	4	5	140	4	8
M_2	9	6	4	216	1	1
M_3	7	3	2	42	9	10
M_4	6	5	5	150	3	4
M_5	5	5	6	150	3	2
M_6	4	6	7	168	2	5
M_7	6	5	4	120	5	6
M_8	4	6	3	72	6	7
M_9	6	5	2	60	8	9
M_{10}	7	5	2	70	7	3

从表中可看出,除 M_2 的排名均为第一以外,其他失效模式的风险排序完全不同,其中 M_1, M_6 和 M_{10} 的排名差距较大,其余则相近却不相同.其中一

个关键的原因是传统 FMEA 模型在实际应用中存在一些不足和缺陷. 例如 M_4 和 M_5 两个失效模式, 两者虽然风险因子的评分不一致但 RPN 却相同, 这导致决策者确定两者的风险处理顺序时产生困难. 而该问题在区间二元语义 FMEA 模型中能够得到解决, 并且可以明确知道, 与 M_4 相比, M_5 具有较高的风险, 应当优先进行风险预防和改进分析.

此外, 风险因子权重在失效模式排序中的作用在两个模型中也得到清楚体现: M_7 在严重度、发生度和检测度上的评价分别为 6, 5, 4; 而 M_{10} 则分别为 7, 5, 2, 两者在发生度上的风险相同, 在严重度上 M_{10} 略高些, 在检测度上则 M_7 略高. 根据传统 FMEA 模型, M_{10} 的风险排序位置 (RPN=70) 在 M_7 (RPN=120) 之后. 然而, 通过权重分析, 严重度在刀具管理业务中所占权重更大, 包含更多风险, 因此实际情况中应优先处理 M_{10} 失效模式.

通过上述比较分析可以发现, 区间二元语义 FMEA 模型解决了传统 FMEA 模型的若干缺陷, 在风险评价上具有明显优势: ①在确定风险排序的过程中考虑了风险因子严重度、发生度和检测度的相对权重, 其中包含主观权重和客观权重. ②灵敏度 λ 的变化取值能够体现决策者在风险评价过程中的态度特征, 决策者甚至可以根据 λ 不同的取值结果反向选择符合自己偏好的一种排序. ③ ITHWD 测度的计算方式能够有效避免不同失效模式的 RPN 计算结果相同的问题. 不同的风险因子值的组合其失效模式往往有截然不同的风险水平. ④改进模型不仅能使决策者采用多粒度语言评价集评价失效模式, 而且还能有效避免语言评价信息处理转换过程中的信息丢失问题.

4 结论

在外包项目中, 企业对业务的控制权会明显降低, 因此, 事先选用有效的风险评价手段和制定改进措施将会大大影响到决策结果和项目进行. 本文利用 ITHWD 测度对传统 FMEA 方法进行改进, 采用区间二元语义 FMEA 模型来确定失效模式的风险排序能. 通过合同履行模块案例分析表明, 本文所提出的改进模型具有以下优势: ①考虑了风险因子的相对权重; ②避免了不同风险因子组合产生相同 RPN 值的问题; ③在风险评价过程中考虑了决策者不同决策特征; ④区间二元组提高了失效模式评价的精确性, 减少信息损失或失真.

区间二元语义 FMEA 模型是在传统 FMEA 模型基础上的改进, 由于该算法的包容性, 在实际的外包风险评价过程中可以加入任意多的风险因子以尽可能全面分析失效风险. 在未来的研究中, 可以将模型与 FTA 等其他可靠性分析工具相结合以提高产品或服务的安全性及可靠性. 此外, 还可以将本文所提出的改进模型用于其他行业的风险评价, 以进一步验证模型的实用性和有效性.

参考文献:

- [1] 尤筱玥, 黄志明. 决策因素分析: 企业非核心业务经营模式的选择[J]. 上海管理科学, 2013, 35(4): 1.
YOU Xiaoyue, HUANG Zhiming. Study on decision factors: Selection of business model for non-core business [J]. Shanghai Management Science, 2013, 35(4): 1.
- [2] Liu H C, Liu L, Liu N. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review [J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(2): 828.
- [3] 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.
- [4] Sharma R K, Kumar D, Kumar P. Systematic failure mode effect analysis (FMEA) using fuzzy linguistic modelling [J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 2005, 22(9): 986.
- [5] 崔文彬, 吴桂涛, 孙培廷, 等. 基于 FMEA 和模糊综合评判的船舶安全评估[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(3): 263.
CUI Wenbin, WU Guitao, SUN Peiting, et al. Ship safety assessment based on FMEA and fuzzy comprehensive evaluation methods [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(3): 263.
- [6] 吴迪, 王旭. BPI 优化方法在服务业应用[J]. 商情, 2014(1): 175.
WU Di, WANG Xu. Optimization method of BPI applied in service industry [J]. Business, 2014(1): 175.
- [7] 尤筱玥, 黄志明. 基于 FMEA 的业务外包风险评估研究[J]. 上海管理科学, 2014, 36(5): 45.
YOU Xiaoyue, HUANG Zhiming. Study on outsourcing risk evaluation based on FMEA [J]. Shanghai Management Science, 2014, 36(5): 45.
- [8] 付煜茗. 基于 FMEA 和 FTA 的三自由度机械手可靠性分析[J]. 机电产品开发与创新, 2013, 26(6): 8.
FU Yuming. Reliability analysis of 3-DOF manipulator based on FMEA and FTA [J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2013, 26(6): 8.
- [9] Silverman M, Johnson J R. FMEA on FMEA [C]// Reliability and Maintainability Symposium (RAMS) 2013 Proceedings-Annual. Orlando: IEEE, 2013: 1-5.
- [10] Gargama H, Chaturvedi S K. Criticality assessment models for failure mode effects and criticality analysis using fuzzy logic [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(1): 102.
- [11] Pillay A, Wang J. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 79(1): 69.

- [12] Wang Y M, Chin K S, Poon G K K, *et al.* Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(2): 1195.
- [13] Yang Z, Bonsall S, Wang J. Fuzzy rule-based Bayesian reasoning approach for prioritization of failures in FMEA [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2008, 57(3): 517.
- [14] Chang C L, Liu P H, Wei C C. Failure mode and effects analysis using grey theory [J]. *Integrated Manufacturing Systems*, 2001, 12(3): 211.
- [15] Liu H C, You J X, Shan M M, *et al.* Failure mode and effects analysis using intuitionistic fuzzy hybrid TOPSIS approach [J]. *Soft Computing*, 2015, 19(4): 1085.
- [16] Sankar N R, Prabhu B S. Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis [J]. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2001, 18(3): 324.
- [17] Chang D S, Sun K L P. Applying DEA to enhance assessment capability of FMEA [J]. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 2009, 26(6): 629.
- [18] Song W, Ming X, Wu Z, *et al.* A rough TOPSIS approach for failure mode and effects analysis in uncertain environments [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2014, 30(4): 473.
- [19] 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.
- [20] Liu H C, Li P, You J X, *et al.* A novel approach for FMEA: Combination of interval 2-tuple linguistic variables and gray relational analysis [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2015, 31(5): 761.
- [21] Chin K S, Wang Y M, Poon G K K, *et al.* Failure mode and effects analysis by data envelopment analysis [J]. *Decision Support Systems*, 2009, 48(1): 246.
- [22] Herrera F, Martínez L. A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2000, 8(6): 746.
- [23] Chen C T, Tai W S. Measuring the intellectual capital performance based on 2-tuple fuzzy linguistic information [C] // Annual meeting of APDSI. Taiwan: APDSI, 2005.
- [24] Zhang H. The multiattribute group decision making method based on aggregation operators with interval-valued 2-tuple linguistic information [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2012, 56(1/2): 27.
- [25] Liu H C, You J X, You X Y. Evaluating the risk of healthcare failure modes using interval 2-tuple hybrid weighted distance measure [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 78: 249.
- [26] Liu H C, Liu L, Bian Q H, *et al.* Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory [J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(4): 4403.
- [27] Liu H C, Liu L, Li P. Failure mode and effects analysis using intuitionistic fuzzy hybrid weighted Euclidean distance operator [J]. *International Journal of Systems Science*, 2014, 45(10): 2012.

(上接第 290 页)

参考文献:

- [1] Turner J D. Development of a rotating-shaft torque sensor for automotive applications [J]. *Control Theory and Applications: IEE Proceedings D*, 1988, 135(5): 334.
- [2] 姚科业. 汽车传感器 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- YAO Keye. *Automotive sensor* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [3] 洪兢. 面向操纵稳定性的汽车扭矩主动分配差速技术研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- HONG Jing. *Research on torque vectoring differential technology for vehicle stability control* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [4] 安相璧. 汽车试验工程 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- AN Xiangbi. *Automobile test project* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [5] 陶红艳, 余成波. 传感器与现代检测技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- TAO Hongyan, YU Chengbo. *Sensor and modern testing technology* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [6] 付百学. 汽车试验技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- FU Baixue. *Automobile test technology* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007.
- [7] 刘丽霞. 车辆扭矩与转速测试系统 [J]. *仪表技术与传感器*, 2010(7): 89.
- LIU Lixia. *Rotation speed and torque test system for vehicle* [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2010(7): 89.
- [8] 文西芹, 张永忠. 扭矩传感器的现状与发展趋势 [J]. *仪表技术与传感器*, 2001(12): 1.
- WEN Xiqin, ZHANG Yongzhong. *Present situation and development trend of the torque sensors* [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2001(12): 1.
- [9] Yeh C T, Tsai N C, Chiu H L, *et al.* Digital high-resolution torque sensor and signal processing [J]. *IEEE Sensor Journal*, 2015, 15(4): 2093.
- [10] Kim J S, Kim G W. New non-contacting torque sensor based on the mechanoluminescence of ZnS: Cu microparticles [J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2014, 218: 125.
- [11] YU Chengbo, ZHAN Lian, CHEN Xuejun, *et al.* Research on non-contact torque measurement based on screw-type differential transformer [C] // Proceedings of the eighth international conference on electrical machines and systems. Piscataway: IEEE, 2005: 2366-2368.
- [12] 何耀华. 汽车试验技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- HE Yaohua. *Automobile test technology* [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.