

# 基于云模型与凝聚型层次聚类的失效模式与影响分析 方法

尤建新<sup>1</sup>, 陈雨婷<sup>1</sup>, 宫华萍<sup>2</sup>, 徐涛<sup>1</sup>

(1. 同济大学 经济与管理学院; 2. 同济大学 外国语学院, 上海 200092)

**摘要:** 针对传统失效模式与影响分析(failure mode and effect analysis, FMEA)的不足, 提出了一种基于云模型和凝聚型层次聚类算法的改进FMEA方法。首先, 运用云模型对专家评估信息进行描述与集结; 然后, 结合凝聚型层次聚类算法识别云模型评价信息, 利用聚类子簇确定失效模式间关联关系, 利用聚类结果确定失效模式风险等级。最后, 以在线教学失效风险评估为例, 验证了该改进FMEA方法的可行性和有效性。

**关键词:** 失效模式与影响分析; 云模型; 凝聚型层次聚类; 在线教学风险

中图分类号: C93-03

文献标志码: A

## Improving FMEA Based on Cloud Model and Hierarchical Agglomerative Clustering

YOU Jianxin<sup>1</sup>, CHEN Yuting<sup>1</sup>, GONG Huaping<sup>2</sup>, XU Tao<sup>1</sup>

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

University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** An improved FMEA method based on cloud model and agglomerated hierarchical clustering algorithm is proposed as to improve the RPN algorithm of failure mode and effect analysis (FMEA). Firstly, the expert evaluation information is described and aggregated by the cloud model. Then, the cloud model is improved by the agglomerated hierarchical clustering algorithm, the correlation relationship among the failure modes is determined according to the clustering sub-clusters of the cloud model, and the risk level of the failure modes is determined according to the clustering results. Finally, the application and validity of the improved FMEA method are verified, by taking the online teaching failure risk assessment as an example.

**Key words:** failure mode and effect analysis (FMEA); cloud model; hierarchical agglomerative clustering; E-Learning risk

失效模式与影响分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)是一种可靠性分析与风险管理中重要的理论和方法, 经多年发展后现已被广泛应用于医疗、制造、航空等多个领域<sup>[1-2]</sup>。传统FMEA方法通过计算失效模式的发生度(Occurrence, O)、严重程度(Severity, S)和可检测度(Detection, D)三个风险因子的乘积得到风险优先值(Risk Priority Number, RPN), 存有较多缺陷: ①不同O、S和D值的组合可能会产生相同RPN值, 但其风险影响可能完全不同,

无法确定实际风险水平; ②风险因子值需用精确值评估, 但在实际场景中往往难以精准表述; ③未考虑风险因子内部的相对重要度, 实际问题中因子权重可能存在差异。目前国内外关于FMEA方法改进的研究较多, 主要包括基于隶属度函数、语言符号<sup>[3]</sup>、二元语义<sup>[4]</sup>和结合多准则决策、模糊集理论等的方法, 如Illankumaran等<sup>[5]</sup>应用模糊层次分析法建立一个群评价框架来对FMEA方法进行改进; Braglia等<sup>[6]</sup>提出基于模糊的逼近理想解排序的改进FMEA方

收稿日期: 2020-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(71671125)

第一作者: 尤建新(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 管理学博士, 主要研究方向为管理理论与工业工程、质量与创新。

E-mail: yjx2256@vip.sina.com

通信作者: 宫华萍(1981—), 女, 高级工程师, 管理学博士, 主要研究方向为质量管理、个性化在线教学和外语教育技术。

E-mail: gh\_apple@163.com



论文  
拓展  
介绍

法;Liu等<sup>[7]</sup>提出基于多准则妥协解排序的改进FMEA方法等。近年来,将聚类技术应用于风险识别逐渐成为改进FMEA的重要方法,如Liu等<sup>[8]</sup>提出一种基于噪声密度聚类和动态专家评价方法的改进FMEA方法;Duan等<sup>[9]</sup>基于 $k$ 均值聚类和犹豫模糊语言评价改进FMEA方法等。已有研究虽然极大地促进FMEA方法的发展,但以下方面仍有待继续深入研究:①已有风险评估信息表征方法虽在一定程度上改进了语言评价的模糊性,但难以同时精准描述风险评估的模糊性和随机性;②尚未形成较为成熟的风险分类方法,而风险分类一般比排序计算更节约时间和成本;③多数聚类技术缺少考虑不同风险类别间的联系,且需事先指定聚类数。

本文基于云模型(Cloud Model)与凝聚型层次聚类算法,提出了一种改进的FMEA方法。该方法利用云模型处理具有随机模糊性语言评价的失效模式,为失效模式层次关系分析和风险等级识别提供有效途径;在线教学风险分析的应用验证新方法的有效性,分析结果为高校在线教学短板问题的改进提供决策参考。

## 1 基础知识

### 1.1 云模型

云模型是李德毅等<sup>[10-11]</sup>基于模糊理论和概率论提出的一种将自然语言描述的定性指标与定量指标相互转化的理论。正态分布的云模型(高斯云)具有通用性和稳定性<sup>[12]</sup>。设定性概念 $C$ 的一次随机实现(随机云滴)为 $x \in U$ ,  $x$ 对 $C$ 的确定度 $\mu(x) \in [0, 1]$ 是具有稳定倾向的随机数<sup>[13]</sup>,且对于 $\forall x \in U$ ,有 $x \rightarrow \mu(x)$ 。

云模型由三个数值特征进行定性表示,记为 $C(E, E_{\text{熵}}, H_{\text{熵}})$ 。其中,期望值 $E$ 为最典型样本,是定性云滴组的核心;熵 $E_{\text{熵}}$ 为定性概念的不确定性度量,类似于概率论中随机变量的方差;超熵 $H_{\text{熵}}$ 为 $E_{\text{熵}}$ 的二阶熵,代表云滴的凝聚力,是熵的不确定度<sup>[14]</sup>。定量论域 $U$ 是由三个数值特征产生的随机云滴,以进行精确数值的定量表示。云模型的优点在于:①允许评价语言在一定论域中服从概率分布,减少个体评价带来的不确定性;②借助云集结算子减少集结评价信息时的信息扭曲问题;③同时考虑评价决策信息的模糊性和随机性。

### 1.2 前向云生成器算法与云大小比较

**定义1** 设云滴 $(x, y)$ 对定量论域 $U$ 的贡献为 $s = xy$ ,则该云滴所在的任何云 $A$ 可以用 $s$ 期望值 $\hat{s}$ 作为云 $A$ 对论域 $T$ 的总体得分。利用正向云发生器 $G(E, E_{\text{熵}}, H_{\text{熵}}, n)$ 产生云模型的云滴样本,对云 $A$ 的

期望进行数值估计,正向云发生器 $G$ 随机迭代 $n$ 次得到每个云滴的大小 $s_i = x_i y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。其中, $E'_{\text{熵}i} \sim N(E_{\text{熵}}, H_{\text{熵}}^2)$ ,  $x_i \sim N(E, E_{\text{熵}i}^2)$ 。通过计算符合云数值特征的随机云滴贡献得分的样本均值,实现不同云之间的比较。设估计值 $\hat{s}(A) \geq \hat{s}(B)$ ,则有 $A \geq B$ ,则

$$\hat{s}(A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i, y_i = e^{-(x_i - E)^2 / 2E_{\text{熵}i}^2} \quad (1)$$

### 1.3 云运算算子

**定义2** 对任意两朵云 $A(E_1, E_{\text{熵}1}, H_{\text{熵}1})$ 和 $B(E_2, E_{\text{熵}2}, H_{\text{熵}2})$ ,满足以下基本运算规则,即 $A + B =$

$$(E_1 + E_2, \sqrt{E_{\text{熵}1}^2 + E_{\text{熵}2}^2}, \sqrt{H_{\text{熵}1}^2 + H_{\text{熵}2}^2}) \quad (2)$$

$$\lambda A = (\lambda E_1, \sqrt{\lambda} E_{\text{熵}1}, \sqrt{\lambda} H_{\text{熵}1}) \quad (3)$$

设 $\Omega$ 是所有云的集合,云 $Y_i = (E_i, E_{\text{熵}i}, H_{\text{熵}i})$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )为 $\Omega$ 的子集,实现映射方式 $\Omega^n \rightarrow \Omega$ 的两种算子定义如下:

**定义3** 云算术加权平均算子 $O_{\text{算}}$ (Cloud-Weighted Arithmetic Average)

$$O_{\text{算}\omega}(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) = \sum_{i=1}^n \omega_i Y_i \quad (4)$$

式中: $\omega$ 是云 $Y_i$ 的相关权重向量,满足 $\omega_i \in [0, 1]$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ 。

**定义4** 云混合加权平均算子 $O_{\text{混}}$ (Cloud Hybrid Aggregation)<sup>[15]</sup>

$$O_{\text{混}\omega, w}(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) = \sum_{i=1}^n w_i B_i \quad (5)$$

式中: $B_i$ 是云算术加权平均算子 $O_{\text{算}}$ 集结后权重云 $(n\omega_1 Y_1, n\omega_2 Y_2, \dots, n\omega_n Y_n)$ 中第 $i$ 大的云; $n$ 是平衡系数; $w$ 是 $B_i$ 对应的权重向量,满足 $w_j \in [0, 1]$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ),  $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ ,  $w_j$ 为

$$w_j = Q\left(\frac{j}{n}\right) - Q\left(\frac{j-1}{n}\right), j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$Q(y)$ 是一个单调递增的函数,即

$$Q(y) = \begin{cases} 0, & y < a \\ \frac{y-a}{b-a}, & a \leq y \leq b \\ 1, & y \geq b \end{cases} \quad (7)$$

### 1.4 评价语言映射

**定义5** 设有限奇数粒度评价术语集 $H = \{H_i | -g, \dots, 0, \dots, g, g \in N^*\}$ 是一系列正整数,满足条件:①若 $i > j$ ,则 $H_i > H_j$ ;②若 $H_i$ 对应的评价语言为负数,则用 $\text{neg}(H_i) = H_{-i}$ 表示。设 $H_i$ 有效域为

$[X_{\min}, X_{\max}]$ , 根据韦伯定律<sup>[16]</sup>, 从  $H_i$  映射到  $\theta_i (i = -g, \dots, 0, \dots, g)$  映射函数  $f$  为

$$f: H_i \rightarrow \theta_i (i = -g, \dots, 0, \dots, g)。$$

$$\theta_i = \begin{cases} (\alpha^g - \alpha^{-i}) / (2\alpha^g - 2), (-g \leq i \leq 0) \\ (\alpha^g + \alpha^{-i} - 2) / (2\alpha^g - 2), (0 < i \leq g) \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta_i \in [0, 1]$$

式中:  $\alpha$  作为经验值主要分布在  $[1.36, 1.4]$  区间<sup>[17]</sup>。

**定义6** 将区间云模型距离<sup>[18]</sup>进行简化, 根据汉明距离, 云  $y_1$  与云  $y_2$  之间的距离为

$$d(y_1, y_2) = \left| (E_1 - E_{\text{嫡}1} - H_{\text{嫡}1}) - (E_2 - E_{\text{嫡}2} - H_{\text{嫡}2}) \right| \quad (9)$$

## 2 改进FMEA方法

本文提出的基于云模型与凝聚型层次聚类的改进FMEA方法(见图1), 主要包括3个阶段: ①失效模式风险评估, 进行失效模式语言评估信息收集, 获取语言评价风险评估矩阵; ②云模型评价信息集结, 采用云模型表示专家评价语言, 集结专家风险评价信息; ③失效模式关联发现与风险聚类, 进行凝聚型层次聚类, 计算失效模式之间的关联度, 确定失效模式风险等级。

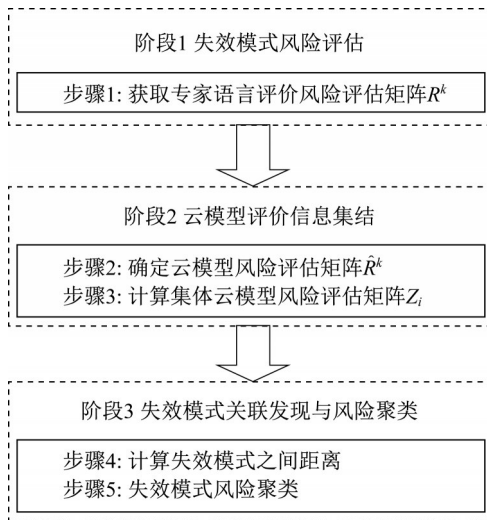


图1 改进FMEA方法框架流程图

Fig.1 Flowchart of the improved FMEA method

### 2.1 失效模式风险评估

假设有失效模式  $F_i (i = 1, 2, \dots, m)$  和风险因子  $r_j (j = 1, 2, \dots, n)$ , 其相应的权重为  $\omega$ , 满足

$\omega_j \in [0, 1] (j = 1, 2, \dots, n), \sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 。假设有  $k$  个专家进行评价, 每个专家对失效模式的评价表示为  $T_k (k = 1, 2, \dots, l)$ , 语言集  $H = \{H_{-g}, \dots, H_0, \dots, H_g\}$  表示专家评价时所采用的评价语言标准。

**步骤1** 获取专家语言评价风险评估矩阵  $R^k$

专家根据语言集标准对失效模式的评价, 得到专家语言评价风险评估矩阵  $R^k$ 。其中,  $r_{ij}^k$  为专家对失效模式  $F_i$  的风险因子  $r_j$  做出的评价,  $R^k = (a_{ij}^k)_{m \times n} (k = 1, 2, \dots, t; i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 。在利用德尔菲法对专家评价进行分析时, 考虑到不同专家背景和经验不同可能带来偏差, 设专家权重为  $\lambda_i$ , 且满足  $\sum_{i=1}^k \lambda_i = 1$ 。

### 2.2 云模型评价信息集结

**步骤2** 确定云模型风险评估矩阵  $\hat{R}^k$

将定量语言映射到云模型的“数值信息”, 即期望值  $E$  上, 进一步确定云模型的定性表示  $Y_i(E_i, E_{\text{嫡}i}, H_{\text{嫡}i})$ 。

根据定义5确定映射函数  $f$ , 计算评价语言映射值  $\theta_i$ 。根据  $\theta_i$  计算均值  $E_i, E_{\text{嫡}i}, H_{\text{嫡}i}$  可得

$$E_i = X_{\min} + \theta_i (X_{\max} - X_{\min}) \quad (10)$$

设云滴  $(x, y)$  满足以下两个正态分布条件, 其中  $E_{\text{嫡}i}$  为  $E'_{\text{嫡}i}$  的期望值, 则

$$x \sim N(E_i, E_{\text{嫡}i}^{'2}), E'_{\text{嫡}i} \sim N(E_{\text{嫡}i}, H_{\text{嫡}i}^{'2})$$

$$E'_{\text{嫡}i} = \max \{X_{\max} - E_i, E_i - X_{\min}\} / 3 \quad (11)$$

$$\begin{cases} E_{\text{嫡}i} = (E'_{\text{嫡}i-1} + E'_{\text{嫡}i} + E'_{\text{嫡}i+1}) / 3, \\ E_{\text{嫡}-i} = E_{\text{嫡}i}, (|i| = 0, 1, \dots, g-1) \\ E_{\text{嫡}g} = \frac{E'_{\text{嫡}g-1} + E'_{\text{嫡}g}}{2}, \\ E_{\text{嫡}-g} = E_{\text{嫡}g}, (|i| = g) \end{cases} \quad (12)$$

$$H_{\text{嫡}-i} = H_{\text{嫡}i} = (E_{\text{嫡}}^{' +} - E_{\text{嫡}i}) / 3$$

$$E_{\text{嫡}}^{' +} = \max_k \{E_{\text{嫡}k}^{'}\} \quad (13)$$

确定  $Y_i$  后, 将专家语言评价风险评估矩阵  $R^k$  转化为云模型风险评估矩阵  $\hat{R}^k = (\hat{r}_{ij}^k)_{m \times n}$ 。

**步骤3** 计算集体云模型风险评估矩阵  $Z_i$

首先, 根据  $O_{\text{算}}$  (定义3), 集结每个失效模式不同风险因子的评价信息, 得到第  $k$  个专家对第  $i$  个模式  $F_i$  的综合评价  $Z_i^k = (z_i^k)_{m \times t}$ , 具体计算如下:

$$\begin{aligned} z_i^k = O_{\text{算}w}(\hat{r}_{i1}^k, \hat{r}_{i2}^k, \dots, \hat{r}_{in}^k) = \\ (\sum_{j=1}^n \omega_j E_{ij}^k, \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (E_{\text{熵}ij}^k)^2} \\ \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (H_{\text{熵}ij}^k)^2}) \end{aligned} \quad (14)$$

然后,利用 $O_{\text{混}}$ (定义4)集结不同专家的评价信息,得到集体云模型风险评估矩阵 $Z_{i0}$ 。根据专家的综合评价计算权重云 $\lambda_k Z_i^k$ ,用正向云发生器估计权重云 $(\lambda_1 Z_i^1, \lambda_2 Z_i^2, \dots, \lambda_l Z_i^l)$ 的大小顺序,再确定相关权重 $w$ ,最终得到失效模式的集体云模型风险评估矩阵 $Z_i = (z_i)_{i \times 1}$ ,具体计算如下:

$$\begin{aligned} z_i = O_{\text{混}w,w}(z_i^1, z_i^2, \dots, z_i^l) = \\ (\sum_{k=1}^l w_i E_i^k, \sqrt{\sum_{k=1}^l w_i (E_{\text{熵}i}^k)^2}, \sqrt{\sum_{k=1}^l w_i (H_{\text{熵}i}^k)^2}) \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $E_i^k, E_{\text{熵}i}^k, H_{\text{熵}i}^k$ 是 $B_i$ (权重云排序后第 $i$ 大云)的三个数值特征。

### 2.3 失效模式关联发现与风险聚类

凝聚型层次聚类算法是一种易发现类层次关系和无需事先指定聚类数的经典无监督算法<sup>[19]</sup>。

#### 步骤4 计算失效模式之间距离

根据定义6得到由集体云模型风险评估云距离表示的临近度矩阵,如计算失效模式 $FM_1$ 与 $FM_2$ 的距离:

$$d(z_1, z_2) = |(E_1 - E_{\text{熵}1} - H_{\text{熵}1}) - (E_2 - E_{\text{熵}2} - H_{\text{熵}2})| \quad (16)$$

式中, $z_1 = (E_1, E_{\text{熵}1}, H_{\text{熵}1}), z_2 = (E_2, E_{\text{熵}2}, H_{\text{熵}2})$ 。

#### 步骤5 失效模式风险聚类

根据凝聚型层次聚类算法,每次合并最相邻的两个簇后更新临近度矩阵,重复这一过程,直至仅剩下一个簇时结束。最后,根据聚类结果对失效关联关系和风险等级进行进一步分析。

## 3 案例分析

疫情后在线教学的大规模实施,虽在一定程度上保证教学的持续性,但仍存在较多不足和问题,亟需查找短板、改进质量。基于已有研究<sup>[20-21]</sup>,通过高校学生群体的问卷调查及专家访谈,确定15项常见在线教学失效模式,失效模式表现及因果分析如下(见表1)。

表1 在线教学常见失效模式及因果分析表

Tab.1 FMEA analysis of E-learning system

风险模块	编号	潜在失效模式	失效原因	失效后果
教学形式 $B_1$	$F_1$	课程形式单调	教学设计不合理,线上环境局限,节奏拖沓等	教学内容低质量,学生学习兴趣低
教学内容 $B_2$	$F_2$	知识结构不完整	课件没有根据在线教学情境改进,信息不完整	学生对教学内容转化率低
教学互动 $B_3$	$F_3$	互动频率下降	在线互动被聚焦,与教师沟通交流频率变低等	学生参与感下降,学习积极性下降
	$F_4$	教学反馈不及时	学生反馈被动,教师无法获知学生的掌握程度等	教师无法及时解惑,教学兴趣降低
	$F_5$	情景体验不足	线上教学场景局限,缺乏交流的情境感等	知识吸收差,学生体验感不足
教学安排 $B_4$	$F_6$	教学缺乏弹性	教学安排不合理,不可调整	健康受影响,学习可持续性下降
教学平台 $B_5$	$F_7$	教学现场效果弱	功能设计不合理,板书操作不便等	教学体验感下降,内容接受度下降
	$F_8$	课程录像效果差	播放和导航不合理,共享性差等	教学资源利用不充分,学习效率低
	$F_9$	演示操作不流畅	传输效果不佳,界面切换不方便,有延迟	影响教学进度与学生认知理解
教学环境 $B_6$	$F_{10}$	物理环境不友好	上课时缺少安静、无干扰的环境	学习效率低,学生注意力下降
	$F_{11}$	网络带宽不支持	网络设备故障,带宽不足,易卡顿、掉线等	影响学生参与积极性
	$F_{12}$	软件设备出故障	软件性能不稳定,登录失效或闪退等	影响教学进度与教学效果
教学效果 $B_7$	$F_{13}$	教学结果评估难	缺少有效评测方法,检查作业不方便等	教师无法持续改进教学方法
	$F_{14}$	学习过程效率低	学习者自主学习能力差,易分心等	学习兴趣低,存在依赖心理
	$F_{15}$	学习有效性差	上课易走神,自我降低要求,缺少实时提醒等	知识获取率降低,破坏学习习惯

### 3.1 失效模式风险评估

根据风险因子(O、S、D)建立七级粒度语言评价标准集 $H$ ,进行失效模式风险评价。根据发生频率增加、影响程度变大、被检测到难度递增的原则, $H = \{H_i | i = -3, -2, -1, \dots, +3\}$ 依次为“极低(VL)、低(L)、较低(ML)、中等(M)、较高(MH)、高(H)、极高(VH)”,如VH代表“频繁发生、影响极大、极难被检测到”。设FMEA评价专家团由5位成员组成,专家权重 $\lambda = (0.15, 0.15, 0.25, 0.15, 0.30)$ ,风

险因子权重 $w = (0.45, 0.30, 0.25)$ ,专家语言评价风险评估结果见表2。

### 3.2 失效模式云评估信息集结

首先,将语言变量转化为云模型。定量论域 $[X_{\min}, X_{\max}] = [0, 10]$ ,根据式(8),取经验值 $\alpha = 1.4$ ,分别得到七粒度语言集的 $\theta_i, E_i, E_{\text{熵}i}$ 和 $H_{\text{熵}i}$ 的值,其中 $\theta_{-3}$ 至 $\theta_{+3}$ 的值依次为0, 0.225, 0.385, 0.500, 0.615, 0.775和1。7个语言变量 $H_i$ 按式(10)~式(13)转化为7朵评估云,得到云模型风险评估矩阵 $\hat{R}^k$ 。形成七朵

表2 专家语言评价风险评估矩阵表  $R^k$   
Tab.2 Evaluation of failure modes  $R^k$

专家	权重	$F_1$			$F_2$			$F_3$			$F_4$			$F_5$		
		O	S	D	O	S	D	O	S	D	O	S	D	O	S	D
1	0.15	MH	MH	ML	MH	H	H	VH	H	ML	MH	M	L	ML	L	M
2	0.15	H	H	ML	MH	H	ML	MH	MH	M	MH	MH	MH	H	ML	MH
3	0.25	MH	M	L	ML	L	ML	MH	H	ML	H	MH	ML	H	M	L
4	0.15	ML	H	M	MH	MH	MH	L	H	ML	MH	M	H	H	VH	L
5	0.30	VH	ML	VL	M	MH	L	H	ML	L	M	L	M	H	MH	MH
专家	权重	$F_6$			$F_7$			$F_8$			$F_9$			$F_{10}$		
		O	S	D	O	S	D	O	S	D	O	S	D	O	S	D
1	0.15	L	L	L	ML	ML	ML	M	L	ML	ML	ML	VL	L	L	ML
2	0.15	L	VH	L	MH	MH	M	M	M	MH	L	H	VL	ML	VH	VL
3	0.25	L	L	VL	MH	H	L	ML	H	L	MH	ML	L	MH	L	L
4	0.15	L	M	VL	L	MH	M	L	M	L	ML	L	ML	ML	MH	L
5	0.30	ML	M	L	M	L	L	ML	M	ML	ML	M	L	MH	ML	L
专家	权重	$F_{11}$			$F_{12}$			$F_{13}$			$F_{14}$			$F_{15}$		
		O	S	D	O	S	D	O	S	D	O	S	D	O	S	D
1	0.15	ML	L	L	M	M	ML	M	M	ML	L	ML	MH	H	H	H
2	0.15	ML	H	L	L	VH	ML	MH	MH	M	H	H	L	H	H	L
3	0.25	M	H	L	ML	H	L	MH	MH	MH	MH	H	MH	MH	H	H
4	0.15	M	M	M	ML	M	L	M	MH	M	MH	MH	H	H	VH	H
5	0.30	M	MH	VL	M	H	VL	M	MH	VH	M	VH	MH	M	VH	H

云  $Y_i$  分别为  $Y_3(0, 2.959, 0.125)$ ,  $Y_2(2.248, 2.655, 0.226)$ ,  $Y_4(3.853, 2.100, 0.411)$ ,  $Y_0(5, 1.922, 0.470)$ ,  $Y_{+1}(6.147, 2.100, 0.411)$ ,  $Y_{+2}(7.752, 2.655, 0.226)$ ,  $Y_{+3}(10, 2.959, 0.129)$ 。

其次,根据风险因子评价形成失效模式的综合评价。根据式(14)集结  $F_i$  的风险评价,得到专家  $k$  对  $F_i$  的云模型综合评价  $Z_i^k$ 。然后根据式(2)、式(3)得到  $\lambda_k Z_i^k (i=1, \dots, 15; k=1, \dots, 5, l=5)$  的计算结果。

最后,用正向云发生器比较  $\lambda_k Z_i^k$  大小,依据式(6)、式(7)和式(15),使用级别词对中“极端”原则,设参数  $(a, b) = (0.15, 0.95)$ , 得到  $w = (0.063, 0.250, 0.250, 0.250, 0.188)$ , 最终得到  $F_i$  集体云模型风险评估  $Z_i (i=1, 2, \dots, 15)$  依次为  $z_1(5.102, 2.224, 0.349)$ ,  $z_2(4.832, 2.175, 0.340)$ ,  $z_3(4.912, 2.358, 0.331)$ ,  $z_4(5.052, 2.178, 0.388)$ ,  $z_5(5.373, 2.364, 0.305)$ ,  $z_6(2.527, 2.532, 0.245)$ ,  $z_7(4.159, 2.259, 0.363)$ ,  $z_8(4.143, 2.311, 0.327)$ ,  $z_9(3.421, 2.292, 0.327)$ ,  $z_{10}(3.572, 2.378, 0.298)$ ,  $z_{11}(4.158, 2.232, 0.379)$ ,  $z_{12}(4.223, 2.314, 0.325)$ ,  $z_{13}(5.321, 1.996, 0.408)$ ,  $z_{14}(5.652, 2.308, 0.319)$ ,  $z_{15}(6.800, 2.476, 0.260)$ 。

### 3.3 失效模式关联发现与风险聚类

根据式(16)计算云的临近度,将失效模式“ $F_1 \sim F_{15}$ ”分别用数字“0~14”顺序索引进行凝聚型层次聚类,以树状图表示层次聚类结果(见图2)。图中纵坐标表示为簇间云距离,横坐标为失效模式索引,若有多个距离相近的失效模式聚类簇,则用所含

失效模式的数量表示,如图2(a)中的“(5)”表示包含五个距离相近失效模式的聚类簇。聚类结果显示,“ $F_{15}$ ”、“ $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_{13}, F_{14}$ ”、“ $F_7, F_8, F_{11}, F_{12}$ ”、“ $F_9, F_{10}$ ”、“ $F_6$ ”的风险等级依次为“VH-H-M-L-VL”。

根据聚类结果可知,在线教学失效模式“知识获取率降低( $F_{15}$ )”的不良影响明显超出其他失效模式,是在线教学质量改进的重点。失效模式教学形式单调( $F_1$ )、知识结构不完整( $F_2$ )、互动频率下降( $F_3$ )、教学反馈不及时( $F_4$ )、场景体验不足( $F_5$ )、教学结果评估难( $F_{13}$ )、知识回顾效率低( $F_{14}$ )风险层级较高。从风险模块来说,教学形式( $B_1$ )、教学内容( $B_2$ )、教学互动( $B_3$ )与教学效果( $B_7$ )这四个风险模块相关项需要引起重视。层次聚类结果与先前设置的风险模块内容一致,有助于从风险所属模块角度对风险进行识别。教学效果( $B_7$ )是其他六个风险模块等潜在风险综合作用的结果,特增加该类子项表示用户感知学习质量的重要性。

该改进FMEA方法不仅识别出在线教学“VH、H、M、L、VL”5类风险,从下至上的聚类过程还增强了风险模块内部关联关系的可解释性。图2c横坐标中:“6~10”表示出“教学现场性减弱( $F_7$ )”与“网络带宽不支持( $F_{11}$ )”这两个失效模式的关联性,说明的是在教学质量中由于受到网络带宽、演示设备等硬件的限制,教师的知识传达与学生的知识接收受到影响;“8~9”代表“演示操作不流畅( $F_9$ )”和“物理环境不友好( $F_{10}$ )”,两者均影响学生的情感学习环境,受影响者的学习积极性下降。“12~13”显示“教学结果评估难( $F_{13}$ )”与“学习

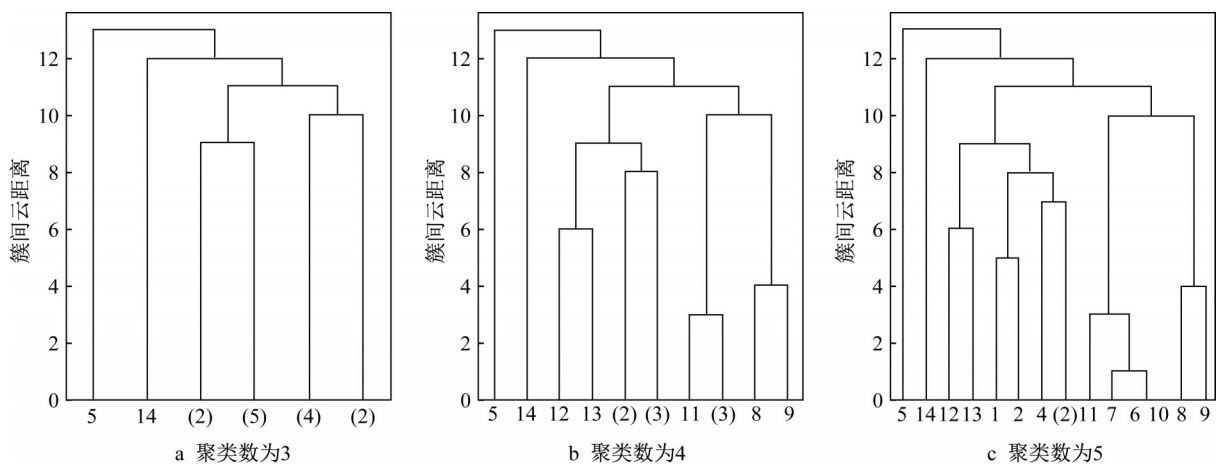


图2 凝聚型层次聚类树状图

Fig.2 Agglomerative hierarchical clustering dendrogram

过程效率低( $F_{14}$ )”这两个“学习效果( $B_7$ )”子项与“ $F_1\sim F_5$ ”相关,即“教学形式、教学内容与教学互动( $B_1\sim B_3$ )”对教学过程的师生双方起到的影响更突出,是需要被着重调整与改善的关键质量短板;而“教学平台( $B_5$ )”与“教学环境( $B_6$ )”的风险影响较弱,需要长期的持续改进。

3.4 比较分析

为证明方法的有效性,将云模型聚类改进的FMEA方法计算结果与传统FMEA的RPN算法进行比较(见表3),两者对失效模式风险级别计算结果

整体一致,但具体排序存在差异,体现了改进FMEA方法对评价的模糊性与随机性。如“教学现场性减弱( $F_7$ )”在传统RPN排序9,但在改进方法中排序11,因为对不同的教学参与者而言,该类失效是随机发生的,且学习者个体适应性不同,处理该类型失效模式的能力也不同。与其他失效模式相比,该失效模式的随机性更强,在改进方法中的风险等级下降。基于改进FMEA方法结合现实情况的随机不确定性,提高了对各层次风险识别的客观性。

表3 3种方法的风险优先排序与等级比较表

Tab.3 Risk ranking or level results by three kinds of methods

失效模式	O	S	D	传统RPN值	传统RPN排序	云模型排序	云模型聚类结果
$F_1$	7.15	5.60	2.45	3.31	8	6	H
$F_2$	5.40	6.05	4.05	4.47	6	8	H
$F_3$	6.85	6.35	3.00	4.40	7	7	H
$F_4$	6.65	4.90	4.80	5.28	5	5	H
$F_5$	7.25	5.45	4.70	6.27	4	3	H
$F_6$	2.30	4.40	1.60	0.55	15	15	VL
$F_7$	5.05	5.15	3.05	2.68	9	11	M
$F_8$	3.45	5.30	3.20	1.97	11	10	M
$F_9$	3.85	4.20	1.85	1.01	14	14	L
$F_{10}$	5.05	4.10	2.00	1.40	13	13	L
$F_{11}$	4.40	6.35	2.15	2.03	10	12	M
$F_{12}$	3.75	7.25	2.00	1.84	12	9	M
$F_{13}$	5.80	6.70	6.40	8.39	3	4	H
$F_{14}$	5.80	7.40	6.40	9.27	2	2	H
$F_{15}$	6.85	8.45	7.10	13.87	1	1	VH

4 结语

基于云模型和凝聚型层次聚类算法的改进FMEA方法特点主要表现为:①更真实地反映了专家的评价信息,用云模型处理风险因子评价信息,考虑了专家语

言评价的模糊性与随机性;②无需事前指定风险类别数量,利用凝聚型层次聚类算法进行失效模式的风险等级分类与内部层次关系识别,在实践中更易操作。在未来研究中,可进一步拓展本方法以处理更复杂的动态风险分析问题,如对方法中涉及的权重进行时间序列的动态调整,对云模型距离的计算方法进行比较

改进等。

## 作者贡献说明:

尤建新:理论框架设计,指导写作和修订。

陈雨婷:模型设计,数据采集和分析、论文写作和修订。

宫华萍:模型完善,案例分析、论文写作和修订。

徐涛:文献梳理,数据调研分析。

## 参考文献:

- [1] ZHANG Hengjie, DONG Yucheng, PALOMARES-CARRASCOSA I, *et al.* Failure mode and effect analysis in a linguistic context: A consensus-based multiattribute group decision-making approach [J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2018, 68(2): 566.
- [2] YAZDI M, DANESHVAR S, SETAREH H. An extension to fuzzy developed failure mode and effects analysis (FDFMEA) application for aircraft landing system[J]. *Safety Science*, 2017, 98: 113.
- [3] YANG Wue, WANG Jianqiang, WANG Xinfan. An outranking method for multi-criteria decision making with duplex linguistic information[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2012, 198: 20.
- [4] 宫华萍, 尤建新. 基于改进 FMEA 的 E-learning 系统质量失效模式风险排序[J]. *科技管理研究*, 2020, 40(9): 176.  
GONG Huaping, YOU Jianxin. Risk ranking of quality failure mode of E-learning System based on improved FMEA[J]. *Science and Technology Management Research*, 2020, 40(9): 176.
- [5] ILANKUMARAN M, SHANMUGAM P, SAKTHIVEL G, *et al.* Failure mode and effect analysis using fuzzy analytic hierarchy process[J]. *International Journal of Productivity and Quality Management*, 2014, 14(3): 296.
- [6] BRAGLIA M, FROSOLINI M, MONTANARI R. Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis[J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2003, 19(5): 425.
- [7] LIU Huchen, YOU Jianxin, LIN Qinglian, *et al.* Risk assessment in system FMEA combining fuzzy weighted average with fuzzy decision-making trial and evaluation laboratory [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2015, 28(7): 701.
- [8] LIU Huchen, CHEN Xuqi, YOU Jianxin, *et al.* A new integrated approach for risk evaluation and classification with dynamic expert weights [J]. *IEEE Transactions on Reliability*. DOI: 10.1109/TR.2020.2973403.
- [9] DUAN Chunyan, CHEN Xuqi, SHI Hua, *et al.* A new model for failure mode and effects analysis based on k-means clustering within hesitant linguistic environment [J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*. DOI: 10.1109/TEM.2019.2937579.
- [10] 焦跃, 李德毅, 杨朝晖. 一种评价 C<sup>3</sup>I 系统效能的新方法[J]. *系统工程理论与实践*, 1998(12): 3.  
JIAO Yue, LI Deyi, YANG Zhaohui. A new method to evaluate the effectiveness of C<sup>3</sup>I system [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 1998(12): 3.
- [11] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. *计算机研究与发展*, 1995(6): 15.  
LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 1995(6): 15.
- [12] LI Deyi, LIU Changyu, GAN Wenyan. A new cognitive model: cloud model [J]. *International journal of intelligent systems*, 2009, 24(3): 357.
- [13] 付斌, 李道国, 王慕快. 云模型研究的回顾与展望[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(2): 420.  
FU Bin, LI Daoguo, WANG Mukuai. Review and prospect on research of cloud model [J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(2): 420.
- [14] WU Xianguo, LIU Qian, ZHANG Limao, *et al.* Prospective safety performance evaluation on construction sites [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2015, 78: 58.
- [15] WANG Jianqiang, LU Peng, ZHANG Hongyu, *et al.* Method of multi-criteria group decision-making based on cloud aggregation operators with linguistic information [J]. *Information Sciences*, 2014, 274: 177.
- [16] DRÖSLER J. An *n*-dimensional Weber Law and the Corresponding Fechner Law [J]. *Journal of Mathematical Psychology*, 2000, 44(2): 330.
- [17] 鲍广宇, 连向磊, 何明, 等. 基于新型语言评估标度的二元语义改进模型[J]. *控制与决策*, 2010, 25(5): 780.  
BAO Guangyu, LIAN Xianglei, HE Ming, *et al.* Improved two-tuple linguistic representation model based on new linguistic evaluation scale[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(5): 780.
- [18] WANG Jianqiang, PENG Juanjuan, ZHANG Hongyu, *et al.* An uncertain linguistic multi-criteria group decision-making method based on a cloud model [J]. *Group Decision and Negotiation*, 2015, 24(1): 171.
- [19] 范明, 范宏建. 数据挖掘导论[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.  
FAN Ming, FAN Hongjian. *Introduction to Data Mining* [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2006.
- [20] 宫华萍, 尤建新, 王岑岚. 互联网学习产品学习者感知质量因素研究[J]. *中国远程教育*, 2020(3): 8.  
GONG Huaping, YOU Jianxin, WANG Cenlan. How do learners perceive the quality of internet-based learning products? [J]. *Distance Education in China*, 2020(3): 8.
- [21] 王丽英, 何云帆, 田俊华. 在线学习行为多模态数据融合模型构建及实证[J]. *中国远程教育*, 2020(6): 22.  
WANG Liying, HE Yunfan, TIAN Junhua. Constructing and verifying a model of integrating multimodal data from online learning behaviors [J]. *Distance Education in China*, 2020(6): 22.