

文章编号: 2095-4980(2021)06-1057-08

基于主客观综合赋权的风险优先数分析

谭正超, 锁 斌, 杨战平*

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 在基于多属性决策(MCDM)的风险优先数(RPN)分析中, 如何有效确定参与故障模式、影响与危害性分析(FMECA)专家的权重至关重要。针对FMECA分析中应用较为广泛的区间数评价信息, 以工作年限、工作经验、对分析对象的熟悉度为指标体系, 提出了专家主观权重的确定方法; 以专家评价信息的相似度为标准, 提出了区间数信息下专家客观权重的确定方法; 两者综合, 得到复合权重, 对多源区间信息进行融合和RPN评价。通过矿用本安电源危害性分析的案例, 表明了所提出方法的合理性和有效性。

关键词: 故障模式、影响与危害性分析; 风险评价; 风险优先数; 区间数; 主客观综合赋权
中图分类号: TP311.5 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA2020063

Risk priority number analysis based on subjective and objective integrated weighting

TAN Zhengchao, SUO Bin, YANG Zhanping*

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: In Risk Priority Number(RPN) analysis based on Multi-Criteria Decision Making(MCDM), it is critically important to determine the weight of each expert in Failure Mode, Effects and Criticality Analysis(FMECA) of a product. For a widely used type of experts' opinions, interval number information, subjective weights are determined by the index system of employment years, working experience and familiarity degree. Then based on the similarities of each two experts' opinions, the method to calculate the objective weight is conducted. The multi-sources experts' opinions are fused by an integrated weighting on the basis of above subjective and objective weights. At last, the effectiveness of proposed method is validated by a criticality analysis of the intrinsically safe power supply applied in mine.

Keywords: Failure Mode, Effects and Criticality Analysis; risk evaluation; Risk Priority Number; interval number; subjective and objective integrated weighting

故障模式、影响与危害性分析(FMECA)是产品可靠性、安全性设计与分析中的一项重要工作, 包括方案阶段的功能FMECA、工程研制阶段的硬件FMECA和生产制造阶段的工艺FMECA等^[1]。通过FMECA, 分析元器件/材料、单元、部组件、整机、系统等各个层次的故障模式, 并对其上一层层次和初始约定层次的影响进行分析和定量评价, 从而为及早发现产品的薄弱环节、制定有针对性的改进措施提供依据。

FMECA是对传统FMEA方法的进一步扩展, 主要区别在于增加了对故障模式的危害性分析(Criticality Analysis, CA)和排序, 从而在众多故障模式中明确产品设计制造中最应关注、需投入最多人力物力的改进之处。在CA方法中, 风险优先数(RPN)由于定义明晰, 操作方便, 结果直观, 在国内外得到了广泛应用。传统的RPN方法定义了危害性分析的3个指标, 即故障模式的严酷度等级 S 、发生概率等级 O 、检测难度等级 D , 通过3个指标的乘积大小来对故障模式的危害性进行排序。在RPN的实际工程应用过程中, 人们也逐渐认识到该方法中存在的一些问题, 例如, RPN值在1~1 000之间呈不连续性和重复性^[2]; S, O, D 为确定的整数值, 难以反映专家评价信息中的不确定性^[3]; 等等。

收稿日期: 2020-02-23; 修回日期: 2020-03-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U183010080)

*通信作者: 杨战平

针对经典RPN方法的缺点,国内外学者提出了一些改进方法。总的来说,这些改进方法主要从2条思路出发:一是对RPN计算公式进行修正^[4-8];二是多属性决策(MCDM)^[9-15]。

RPN计算公式修正的出发点是对RPN的指标进行改进或重新定义,提出新的计算公式。Gilchrist^[4]提出了一种期望损失模型(Expected Cost Model)来修正传统的RPN计算公式,该模型表达为: $EC=CnP_fP_d$,其中 EC 是客户的期望损失, C 是失效费用, n 为每年的产品数量, P_f 为失效概率, P_d 为无法检测出的失效概率;Ben-Daya等^[5]指出,Gilchrist提出的期望损失模型中, P_f 和 P_d 往往并不相互独立,且在产品的设计阶段难以给出估计值,基于此,提出了新的评估模型;Von Ahsen^[6]指出,检测到的内部失效也会导致可观的费用,因此对Gilchrist模型进行了修正,不但包含了外部失效费用,还包含了内部失效费用;陈政平等^[7]提出了一种基于费用及发生概率的定性定量相结合的RPN分析方法,用于装配工艺的过程失效模式及后果分析(Process Failure Modes and Effects Analysis, PFMEA);王贵宝等^[8]基于信息熵理论和随机变量可靠性数理方法,对传统RPN计算公式进行了改进,定义了风险可能数(Risk Possibility Number, RPoN)的概念和计算方法;晋民杰等^[9]基于损失费用改进了风险优先数分析过程,并应用于叉车风险排序。

MCDM方法的出发点是考虑评价信息中的不确定性,对多名专家的评价信息进行融合,以 S,O,D 为评价指标进行多属性融合决策。Wang等^[10]在RPN计算过程中引入了模糊加权几何平均法,建立了模糊风险优先数(Fuzzy RPN, FRPN)计算公式和计算方法;Chang等^[11]采用逼近理想解排序法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)计算RPN;Ahmet^[12]等将模糊层次分析法和TOPSIS相结合,解决风险因子评估中的模糊性问题;Wang等^[13]基于直觉模糊集合(Interval Intuitionistic Fuzzy Sets)对不确定信息进行建模,提出一种集成网络分析法(Analytic Network Process, ANP)和复杂比例评价方法的FMEA新模型,进而实现了RPN的有效评价;Chang^[14]等通过建立故障模式与故障根因之间的网络关联关系,基于灰色系统提出了一种决策试验和评价(Decision Making Trial and Evaluation, DEMATEL)的RPN评价方法;Yang等^[15]和Certa^[16]等采用Dempster-Shafer证据理论融合专家评价信息,根据融合后的基本概率分配(Basic Probability Assignment, BPA)计算RPN。

在基于MCDM的RPN评价方法中,多源评价信息的权重对故障模式的危害性排序影响很大。在已有方法中,有的没有考虑评价人员的权重,有的仅考虑了先验权重,且主要研究了评价信息为模糊数、直觉模糊集、证据结构时的评价方法。本文针对FMECA中较为常用的区间数评价信息,提出了一种评价信息主客观综合赋权方法。该方法中的主观权重主要根据评价人员的工作年限、工作经验等确定;客观权重则根据评价信息间的相似性来确定。给出了多源区间信息融合的方法。最后,通过一个矿用本安电源危害性分析的案例展示该方法在RPN评价中的应用。

1 风险优先数分析简介

风险优先数方法是按产品每个故障模式的风险优先数值进行排序,并采取相应的措施使RPN值达到可接受的最低水平。计算公式为:

$$RPN=S \times O \times D \quad (1)$$

式中: RPN 为产品某个故障模式的风险优先数; S 为故障影响的严酷度等级; O 为故障模式发生概率等级; D 为故障发生的检测难度等级。 S,O,D 的评价值取1~10之间,具体可参见文献[1]。式(1)中RPN数值越大,则其危害性越高。

以 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示故障模式RPN评价的故障模式集;以 $A=\{a_1, a_2, a_3\}$ 表示分别由故障模式的严酷等级(S)、故障模式的发生概率等级(O)和故障模式的被检测难度等级(D)所构成的评价指标集;故障模式 x_i 评价指标 a_j 的评价值用 r_{ij} 来表示,则对于 n 个故障模式的评价问题,其决策矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

采用RPN法进行CA分析时,专家需要对式(2)中的 S,O,D 3个因素进行评价。但评分(1~10分)与等级(如严酷度等级中的“灾难的”、“致命的”、“中等的”、“轻度的”)之间并非一一对应关系,如评分9,10均对应严酷度等级“灾难的”。因此,专家在进行评判时,由于知识、经验的限制,以及评价对象相关信息获取不充分、不完整,在实际的评价过程中,专家评价信息中往往包含大量的不确定性。区间数是表达不确定性的一种有力的数学工具,同时也较为符合人类的思维方式,相对于模糊数、证据结构等评价形式,区间数评价不需要确定隶属度函

数或 BPA，在实际工程中较容易应用。

定义 1: 设 R 为实数域，对给定的 2 个实数 $\underline{x}, \bar{x} \in R$ ，且 $\underline{x} \leq \bar{x}$ ，则 $x^I = [\underline{x}, \bar{x}] = \{x : x \in R, \underline{x} \leq x \leq \bar{x}\}$ 称为有界闭区间，简称区间数或区间。

对对应到专家评价信息，则可以表示为某一评语等级的评价值为区间数。如某专家对严酷度等级的评价值为 [7,8]，代表专家认为该故障模式的严酷度等级为“致命的”，但评价值无法确定确切的数值，认为介于 7 和 8 之间；甚至有时会出现专家对于严酷度的等级都难以确定的情况，如某专家认为某故障模式的严酷度等级介于“致命的”和“灾难的”之间，此时只能给出区间数评价信息[7,10]。

下面按照区间数的评价方式给出专家对某一故障模式 S, O, D 的评价等级的示例，如表 1 所示。

表 1 区间数评价信息示例
Table1 Example of interval estimate information

	index set	interval number
failure mode 1	severity level (S)	[4,5]
	occurrence probability grade(O)	[5,7]
	difficulty level(D)	[7,8]
failure mode 2	severity level(S)	...
	occurrence probability grade(O)	...
	difficulty level(D)	...
...	severity level(S)	...
	occurrence probability grade(O)	...
	difficulty level(D)	...

2 区间数信息下专家主客观综合权重确定方法

严酷度等级、故障模式发生概率等级、检测难度等级等指标的确定依赖于评价人员(专家)经验，不同的专家会给出不同的评价结果，对这些专家评价信息进行融合时，首先要对不同的专家赋予不同的权重。

通常赋权的方法有两类：主观赋权法和客观赋权法。主观赋权法是在评价之前，事先根据专家的工作年限、职称、能力、经验等多个方面综合评判，对每个专家赋予一定的权重。设有 N 个专家，专家的主观权重记为 $\hat{w}_i (i=1,2,\dots,N)$ ；同时，根据专家评价意见，多位专家对指标的意见不可避免存在不一致的情况，根据与群体意见冲突越大可信度越低的原理，可对各专家意见赋予一定的客观权重，记为 $\hat{w}_i (i=1,2,\dots,N)$ ；然后再结合先验的主观权重，最终得到主客观综合权重，用于后续评价。

2.1 专家主观权重确定

在开展 FMECA 之前，先对参与风险分析的评价人员从工作年限、工作经验、对分析对象的熟悉度 3 个维度进行评价，从而得到评价人员的先验权重(也可称为主观权重)。

表 2 主观权重评价指标及标准
Table2 Evaluation index and standard of subject weight

code	evaluating indicator	evaluation criterion	index weight
a_{11}	length of service	20 years max	w_1
a_{12}	work experience	1 point for undertaking one project, 0.5 point for participating in one project, 10 points max	w_2
a_{13}	familiarity	on a 5-point scale, 1 point min, 5 points max	w_3

对评价人员打分的指标及标准如表 2 所示。

从表 2 可见，3 个评价指标并不在同一尺度上，因此首先应对其归一化处理：

$$\begin{cases} \bar{a}_{i1} = a_{i1} / \min(\max\{a_{i1}\}, 20) \\ \bar{a}_{i2} = a_{i2} / \min(\max\{a_{i2}\}, 10) \\ \bar{a}_{i3} = a_{i3} / \max\{a_{i3}\} \end{cases} \quad (3)$$

从表 2 可知，以上 3 个指标中，前 2 个为可以客观量化的指标，只有第 3 个指标 a_3 需要通过主观评价来确定。在工程实际中，可以通过自我评价或他人评价的方式来确定 a_3 值。指标权重 w_1, w_2, w_3 可以通过商议后确定，若实在难以确定，也可以按等权重分配。

设有 n 个专家参与 RNP 评价，按表 2 对专家的综合能力进行打分，得到评价矩阵：

$$C = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

则各个专家的综合能力评价值为：

$$\omega = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

归一化:

$$\bar{\omega}_i = \omega_i / \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (6)$$

$\bar{\omega}_i (i=1,2,\dots,n)$ 即为 n 个参与 RNP 评价专家的主观权重(也称先验权重)。

2.2 专家客观权重确定

设有 L 个专家参与故障模式的 RNP 评价。以 $X=\{x_1,x_2,\dots,x_n\}$ 表示故障模式 RNP 评价的故障模式集; 对于第 i 个故障模式 x_i , 第 m 个专家对评价指标集 $A=\{S,O,D\}$ 的评价值用 $r_{ij}^m (m=1,2,\dots,N; i=1,2,\dots,n; j=1,2,3)$ 来表示, r_{ij}^m 为区间数。则对于故障模式 x_i , 专家评价信息矩阵可表示为:

$$C_i = \begin{bmatrix} r_{i1}^1 & r_{i2}^1 & r_{i3}^1 \\ r_{i1}^2 & r_{i2}^2 & r_{i3}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1}^L & r_{i2}^L & r_{i3}^L \end{bmatrix} \quad (7)$$

多位专家对指标集 A 的意见不可避免存在不一致的情况, 对专家意见进行融合时, 对冲突性的处理尤为关键。根据与群体意见冲突越大可信度越低的原则, 需要对各专家意见赋予一定的权重, 然后再进行融合, 从而得到更为可靠的结果。证据间的相似性从另一个侧面反映了专家意见之间的冲突性, 因此本文首先计算专家意见的相似性, 然后以此为依据计算专家评语的权重。

采用欧氏距离来度量专家 $e_p (1 \leq p \leq L)$ 、 $e_q (1 \leq q \leq L)$ 对指标集 $A=\{S,O,D\}$ 的评价值之间的距离:

$$d_{p,q}^i = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sum_{s=1}^3 (r_{is}^p)^2 + \sum_{t=1}^3 (r_{it}^q)^2 - 2 \sum_{s=1}^3 \sum_{t=1}^3 r_{is}^p r_{it}^q \right)} \quad (8)$$

需要注意的是, 式(8)为区间数运算, 涉及区间数运算规则。设 $a=[a^L, a^U]$, $b=[b^L, b^U]$ 为任意 2 个区间数, 运算规则如下:

a) 加法运算:

$$a + b = [a^L + b^L, a^U + b^U] \quad (9)$$

b) 减法运算:

$$a - b = [a^L - b^L, a^U - b^U] \quad (10)$$

c) 乘法运算:

$$a \cdot b = [a^L, a^U] \cdot [b^L, b^U] = [\min(a^L b^L, a^L b^U, a^U b^L, a^U b^U), \max(a^L b^L, a^L b^U, a^U b^L, a^U b^U)] \quad (11)$$

特别地, 当 a, b 为正区间数时, 有 $a \cdot b = [a^L b^L, a^U b^U]$ 。

有 L 个专家参与风险评价, 则由式(8)可得出 L 个专家对故障模式 x_i 的指标集 $A=\{S,O,D\}$ 评价两两向量之间的距离, 并表示为距离矩阵:

$$D^i = \begin{bmatrix} 0 & d_{1,2}^i & \cdots & d_{1,L}^i \\ d_{2,1}^i & 0 & \cdots & d_{2,L}^i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{L,1}^i & d_{L,2}^i & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{L \times L} \quad (12)$$

向量 $e_p (1 \leq p \leq L)$ 、 $e_q (1 \leq q \leq L)$ 之间的相似系数定义为:

$$s_{pq}^i = 1 - d_{pq}^i \quad (13)$$

即向量间的距离越小, 表明两者的相似程度越大。则所有向量之间的相似矩阵为:

$$S^i = \begin{bmatrix} 1 & s_{1,2}^i & \cdots & s_{1,L}^i \\ s_{2,1}^i & 1 & \cdots & s_{2,L}^i \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{L,1}^i & s_{L,2}^i & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{L \times L} \tag{14}$$

将 S^i 的各行相加，得到各个专家对指标集 $A=\{S,O,D\}$ 的支持度为：

$$z_k^i = \sum_{r=1}^L S_{k,r}^i \quad (k,r=1,2,\dots,L) \tag{15}$$

注意到式(15)得到的结果为区间数，取各区间数的中值，转化为精确值，然后，归一化可得第 k 个专家的权重为：

$$w_k^i = \frac{\text{mid}(z_k^i)}{\sum_{k=1}^L \text{mid}(z_k^i)}, \quad (k=1,2,\dots,L; i=1,2,\dots,n) \tag{16}$$

式中 $\text{mid}(z_k^i)$ 表示区间数 z_k^i 的中值。

2.3 综合权重确定

根据式(6)的主观权重和式(16)的客观权重，可得最终的复合权重为：

$$\bar{w}_k^i = \frac{w_k^i \cdot \bar{w}_k}{\sum_{k=1}^L w_k^i \cdot \bar{w}_k} \quad (k=1,2,\dots,L; i=1,2,\dots,n) \tag{17}$$

3 区间数信息下风险优先数分析

对式(7)进行加权平均，可得第 i 个故障模式融合后的评价价值：

$$\tilde{C}_i = \text{mid}\left(\left[\bar{w}_1^i \ \bar{w}_2^i \ \cdots \ \bar{w}_L^i\right] \times C_i\right) = \left[\bar{w}_1^i \ \bar{w}_2^i \ \cdots \ \bar{w}_L^i\right] \times \begin{bmatrix} r_{i1}^1 & r_{i2}^1 & r_{i3}^1 \\ r_{i1}^2 & r_{i2}^2 & r_{i3}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1}^L & r_{i2}^L & r_{i3}^L \end{bmatrix} = [S^i \ O^i \ D^i] \tag{18}$$

式中： $\text{mid}(\cdot)$ 为区间数中值计算符号； $\tilde{m}(C_i)$ 为最终的群决策信息融合结果，即 S,O,D 的融合评价价值。

最后，根据式(1)计算每个故障模式的 RPN 值。

4 案例分析

矿用本安电源是煤矿监测系统的一种安全供电设备，直接影响到矿井监测系统数据采集的准确性，对矿井的安全生产至关重要^[17]。矿用本安电源主要由一、二级过压/过流保护电路、AC/DC 电路、直流稳压电路 3 部分组成。限于篇幅，本文仅对一、二级过压/过流保护电路进行分析，该电路的故障模式包括绝缘电阻超差、过流保护失效、过压保护失效 3 种。

表 3 专家能力评价指标信息

Table3 Information about the ability of experts

code	role	duration of service/year	work experience	familiarity
1	system designer A	8	undertaking 3 projects, participating in 1 project	4
2	reliability engineer B	8	undertaking 7 projects	2
3	product designer C-1	5	undertaking 2 projects	3
4	product designer C-2	2	undertaking 1 project	3
5	component engineer D	6	participating in 5 projects	2

邀请 5 名专家参与危害性分析，能力评价指标信息如表 3 所示。根据专家商议，工作年限、工作经验、对分析对象的熟悉度 3 个评价指标的权重分别为 0.2,0.3,0.5。

首先对表 3 的数据按式(3)进行归一化处理，如表 4 所示。

则评价矩阵为：

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0.50 \\ 0.63 & 0.57 & 0.75 \\ 0.25 & 0.29 & 0.75 \\ 0.75 & 0.71 & 0.50 \end{bmatrix} \quad (19)$$

表 4 专家能力评价指标信息的归一化处理

Table4 Normalized information about the ability of experts

code	role	duration of service/year	work experience	familiarity
1	system designer A	1.00	1.00	1.00
2	reliability engineer B	1.00	1.00	0.50
3	product designer C-1	0.63	0.57	0.75
4	product designer C-2	0.25	0.29	0.75
5	component engineer D	0.75	0.71	0.50

进而可得专家能力综合评价值：

$$\omega = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0.50 \\ 0.63 & 0.57 & 0.75 \\ 0.25 & 0.29 & 0.75 \\ 0.75 & 0.71 & 0.50 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.3 \\ 0.5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.75 \\ 0.67 \\ 0.51 \\ 0.61 \end{bmatrix} \quad (20)$$

最后，归一化后得到专家主观权重为：

$$\bar{\omega} = \begin{bmatrix} 0.28 \\ 0.21 \\ 0.19 \\ 0.15 \\ 0.17 \end{bmatrix} \quad (21)$$

5 名专家对 3 个故障模式风险因素的评价信息为区间数或确定性信息，打分结果如表 5 所示。

对故障模式“绝缘电阻超差”，采用欧氏距离来度量两两专家对指标集 $A=\{S,O,D\}$ 的评价值之间的距离，计算专家评价意见距离矩阵，结果如下：

表 5 专家评价信息

Table5 Evaluation information of experts

failure mode	risk factor	evaluation information				
		system designer A	reliability engineer B	product designer C-1	product designer C-2	component engineer D
insulation resistance out of tolerance	severity level(S)	(5,6)	(6,7)	5	(5,6)	4
	occurrence probability grade(O)	(3,4)	5	5	5	7
	difficulty level(D)	5	(4,6)	4	5	(3,4)
overcurrent protection failure	severity level(S)	4	(3,4)	5	(4,5)	3
	occurrence probability grade(O)	(1,2)	2	2	(2,3)	2
	difficulty level(D)	(6,7)	6	7	6	8
overvoltage protection failure	severity level(S)	(4,5)	4	2	(2,3)	5
	occurrence probability grade(O)	2	(2,3)	1	2	3
	difficulty level(D)	7	(7,8)	6	7	7

$$D^j = \begin{bmatrix} 0 & (1.22,1.73) & (1.22,1.58) & (0.70,1.41) & (2.64,3.24) \\ (1.22,1.73) & 0 & (1.41,1.58) & 1 & (2.12,2.91) \\ (1.22,1.58) & (1.41,1.58) & 0 & (0.71,1.0) & (2.12,2.64) \\ (0.70,1.41) & 1 & (0.71,1.0) & 0 & 2.12 \\ (2.64,3.24) & (2.12,2.91) & (2.12,2.64) & 2.12 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

相应地，计算专家评价意见的相似性矩阵为：

$$S^1 = \begin{bmatrix} 1 & (0.22,0.73) & (0.22,0.58) & (0.3,0.41) & (1.64,2.24) \\ (0.22,0.73) & 1 & (0.41,0.58) & 0 & (1.12,1.91) \\ (0.22,0.58) & (0.41,0.58) & 1 & (0,0.29) & (1.12,1.64) \\ (0.3,0.41) & 0 & (0,0.29) & 1 & 1.12 \\ (1.64,2.24) & (1.12,1.91) & (1.12,1.64) & 1.12 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

将 S^1 的各行相加，得到各个专家对指标集 $A=\{S,O,D\}$ 的支持度为： $z^1 = \begin{bmatrix} (3.38,4.96) & (3.43,3.55) & (2.76,4.10) \\ (2.41,2.82) & (6.80,7.12) \end{bmatrix}$ ；

归一化可得专家的客观权重为： $w^1 = [0.200\ 1\ 0.170\ 4\ 0.164\ 2\ 0.126\ 8\ 0.338\ 5]$ ，结合专家主观权重，可得故障模式“绝缘电阻超差”专家最终的主客观综合权重为： $\bar{w}^1 = [0.281\ 6\ 0.179\ 8\ 0.155\ 1\ 0.091\ 1\ 0.292\ 5]$ ，根据式(18)可得最终融合后的专家评价信息为： $\tilde{C}_1 = [5.164\ 1\ 5.163\ 1\ 4.406\ 7]$ ，根据式(19)可得故障模式“绝缘电阻超差”RPN值计算结果为 $R_{RPN}^1 = 117.49$ 。

同样的方法，可得故障模式“过流保护失效”专家最终的主客观综合权重为： $\bar{w}^2 = [0.247\ 1\ 0.190\ 0\ 0.173\ 9\ 0.141\ 3\ 0.247\ 7]$ ，RPN 值为 $R_{RPN}^2 = 51.61$ 。故障模式“过压保护失效”专家最终的主客观综合权重为： $\bar{w}^3 = [0.220\ 2\ 0.266\ 8\ 0.129\ 5\ 0.200\ 3\ 0.183\ 2]$ ，RPN 值为 $R_{RPN}^3 = 57.20$ 。

若假设所有专家的权重相同(等权重法)，则可计算矿用本安电源一、二级过压/过流保护电路 3 个故障模式的 RPN 值，如表 6 所示。表 6 中还列出了本文方法得到的结果。

表 6 本文方法与等权重方法计算结果对比
Table 6 Results of proposed method and equal weight method

failure mode	RPN of proposed method	RPN of equal weight method	sorting in proposed method	sorting in equal weight method
insulation resistance out of tolerance	117.49	121.64	1	1
overcurrent protection failure	51.61	53.60	3	2
overvoltage protection failure	57.20	52.16	2	3

从表 6 可知，本文方法和等权重方法得出的 RPN 结果排序不同，本文方法结果中故障模式“过压保护失效”的 RPN 值高于故障模式“过流保护失效”，RPN 排名第 2；而等权重方法则相反，故障模式“过压保护失效”RPN 值排名第 3。定性分析表 5 可知，对于故障模式“过压保护失效”，组件设计师 C-1 给出的评价信息与其他评价人员的信息相比差异较大，评价值明显偏小，因此应该赋予较低权重才更为合理；这样，最终得到的 RPN 值应该比等权重评价 RPN 值高。直观分析的结果与表 6 计算结果相吻合，说明了本文方法的合理性。

5 结论

在基于 MCDM 的 RPN 评价方法中，多名专家评价信息的权重会对故障模式的危害性排序产生较大影响。本文构建了工作年限、工作经验、对分析对象的熟悉度 3 个评价指标，对专家的先验能力进行定量评价，从而确定专家的先验权重；针对区间数评价信息，根据评价信息间的相似度，提出了客观权重的确定方法。案例分析表明了所提出方法的有效性，与传统 RPN 方法相比，能得到更合理的评价结果。本文重点讨论了区间数评价信息下的综合赋权和 RPN 评价方法，对于多区间概率、不完全信息等情况尚未考虑，可以作为后续研究方向。

参考文献：

[1] GJB/Z 1391-2006. 故障模式、影响及危害性分析程序[S]. 2006. (GJB/Z 1391-2006. Failure mode, effects and criticality analysis[S]. 2006.)
 [2] BOWLES J B. An assessment of RPN prioritization in a failure modes effects and criticality analysis[C]// Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium. Tampa, Florida: IEEE, 2003:380-386.
 [3] KESKIN G A, ÖZKAN C. An alternative evaluation of FMEA: fuzzy ART algorithm[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2009, 25(4):647-661.
 [4] GILCHRIST W. Modelling failure modes and effects analysis[J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 1993, 10(2):16-23.
 [5] BEN-DAYA M, RAOUF A. A revised failure mode and effects analysis model[J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 1996, 13(3):43-47.
 [6] VON AHSEN A A. Cost-oriented failure mode and effects analysis[J]. International Journal of Quality & Reliability Management,

- 2008,25(1):466-476.
- [7] 陈政平,付桂翠,赵幼虎. 改进的风险优先数(RPN)分析方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2011,37(11):1395-1399. (CHEN Zhengping,FU Guicui,ZHAO Youhu. Improved analysis method of risk priority number[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011,37(11):1395-1399.)
- [8] 王贵宝,黄洪钟,张小玲. 风险可能数——一种基于最大信息熵理论的风险度量和风险排序新方法[J]. 航空学报, 2009, 30(9):1683-1690. (WANG Guibao,HUANG Hongzhong,ZHANG Xiaoling. Risk possibility number—a new model for risk evaluation and prioritization based on maximum entropy theory[J]. ACTA Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2009,30(9):1683-1690.)
- [9] 晋民杰,李辰,范英,等. 基于损失费用的风险优先数分析方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2013,23(9):45-50. (JIN Minjie,LI Chen,FAN Ying,et al. Research on risk priority number analysis method based on loss[J]. China Safety Science Journal, 2013,23(9):45-50.)
- [10] WANG Y M,CHIN K S,POON G K K. Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean[J]. Expert Systems with Applications, 2009,36(2):1195-1207.
- [11] CHANG K H,CHANG Y C,LEE Y T. Integrating TOPSIS and DEMATEL methods to rank the risk of failure of FMEA[J]. International Journal of Information Technology and Decision Making, 2014,13(6):1229-1257.
- [12] AHMET C K,MEHMET E L. Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP[J]. Expert Systems with Applications, 2012,39(1):61-67.
- [13] WANG Lien,LIU Huchen,QUAN Meiyun. Evaluating the risk of failure modes with a hybrid MCDM model under interval-valued intuitionistic fuzzy environments[J]. Computers & Industrial Engineering, 2016,102(11):175-185.
- [14] CHANG K H, CHANG Y C, TSAI I T. Enhancing FMEA assessment by integrating grey relational analysis and the decision making trial and evaluation laboratory approach[J]. Engineering Failure Analysis, 2015,31(6):211-224.
- [15] YANG Jianping,HUANG Hongzhong,HE Liping,et al. Risk evaluation in failure mode and effects analysis of aircraft turbine rotor blades using Dempster-Shafer evidence theory under uncertainty[J]. Engineering Failure Analysis, 2011,18(8):2084-2092.
- [16] 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 of Engineering and System Safety, 2017,159(1):69-79.
- [17] 杨柳,杨瑞俊. 一种矿用本安电源的 FMEA分析研究[J]. 山西电子技术, 2018,45(6):88-92. (YANG Liu,YANG Ruijun. FMEA analysis of mine intrinsically safe power supply[J]. Shanxi Electronic Technology, 2018,45(6):88-92.)

作者简介:

谭正超(1986-),男,在读硕士研究生,高级工程师,主要从事系统可靠性与安全性分析等方面的研究,email:tan860724@163.com.

锁斌(1979-),男,博士,副研究员,主要研究方向为系统可靠性设计分析、不确定性信息处理.

杨战平(1966-),男,博士,研究员,主要方向为复杂系统综合、分析及仿真等.