

文章编号: 2095-4980(2021)04-0705-07

## 考虑故障模式相关性的模糊 TOPSIS 风险评价方法

李君雅, 锁 斌, 王 琳, 卢 欣

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** 故障模式、影响及危害性分析(FMECA)中基于风险优先数(RPN)的危害性分析方法, 通常用来识别风险因素, 确定关键故障模式和薄弱环节, 提供决策依据。传统 RPN 中评价信息都是确定性信息, 并且没有考虑故障模式的相关性。而在工作实际中, 评价人员由于自身的属性和对评价对象的认识水平的限制, 有时只能给出不确定评价信息, 同时故障模式之间往往存在相关性, 这都会影响最终危害性的分析结果。针对存在的问题, 利用可靠性屋(HoR)来考虑故障模式相关性, 针对三角模糊评价信息采用逼近理想解排序技术(TOPSIS)开展模糊 RPN 评价方法研究。最后结合实际案例, 对不同情况下获得的 RPN 值进行比较。仿真结果表明, 考虑故障模式相关性的模糊 RPN 评价方法, 可以提高 RPN 值的可信度, 为风险决策提供更可靠的依据。

**关键词:** 故障模式、影响及危害性分析; 风险优先数; 故障模式相关性; 可靠性屋; 三角模糊数; 逼近理想解排序技术

中图分类号: TB115

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019339

## Fuzzy TOPSIS risk evaluation method considering failure modes correlation

LI Junya, SUO Bin, WANG Lin, LU Xin

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

**Abstract:** Criticality analysis method based on Risk Priority Number(RPN) in Failure Mode Effects and Criticality Analysis(FMECA), is usually utilized to identify risk factors, determine the critical failure mode and weak links to provide decision-making basis. In traditional RPN, the evaluation information is deterministic and the correlation of failure modes is not considered. In the actual work, the evaluators can only give uncertain evaluation information due to their own attributes and the level of understanding the evaluation objects. Usually there is correlation between failure modes, which will affect the final hazard analysis results. Aiming at the existing problems, the fuzzy RPN evaluation method based on Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution(TOPSIS) for the triangular fuzzy evaluation information is studied by using the House of Reliability(HoR) to consider the correlation of failure modes. Finally, the RPN values obtained in different cases are compared with the actual case. The results show that the fuzzy RPN evaluation method considering failure mode correlation can improve the reliability of RPN value and provide more reliable basis for risk decision.

**Keywords:** Failure Mode Effects and Criticality Analysis; Risk Priority Number; failure modes correlation; House of Reliability; triangular fuzzy number; Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

故障模式、影响及危害性分析(FMECA)作为一种保证产品可靠性的方法, 在产品研制阶段识别潜在可靠性问题, 通过危害性分析, 确定关键故障模式或薄弱环节, 为设计师提供设计改进依据, 为决策者提供决策依据<sup>[1-3]</sup>。FMECA 的核心是基于风险优先数(RPN)的故障模式优先排序, RPN 法通过识别严酷度(Severity, S)、故障发生度(Occurrence, O)和可检测度(Detection, D)等风险因素, 对产品每个故障模式的风险优先数进行排序:  $RPN=S \times O \times D$ 。RPN 数越高, 则危害性越大。其中 S, O, D 由专家定义并给出评价等级<sup>[4-6]</sup>。

收稿日期: 2019-09-11; 修回日期: 2020-01-17

基金项目: 中国人民解放军装备发展部技术基础项目

采用 RPN 方法开展 FMECA 风险分析,操作简单,易于理解,在工程应用上也比较成熟,并已形成了标准<sup>[7]</sup>,但从技术方法的角度上存在以下不足:

- 1) 评价信息的模糊性: 针对风险因素(S,O 和 D),某些情况评价人员更愿意给出一个模糊值;
- 2) 故障模式的相关性: 故障模式间的相互影响关系没有在故障模式风险评估中体现;
- 3) 风险优先数排序: 风险因素(O,S 和 D)的等级数不同,但最后计算出的 RPN 值相同,造成风险识别能力降低。

为解决以上不足,采用模糊信息处理的方法来收集信息,充分考虑各种失效之间的影响来处理信息,采用优化的排序方法进行决策分析。在评价领域,三角模糊数是最为常用的一种模糊数,因为它最符合人类的思维判断。在众多文献中均采用三角模糊数来处理不确定信息,并开展多属性决策<sup>[8-9]</sup>。逼近理想解排序技术(TOPSIS)是一种简单实用且适用于复杂系统的多因素决策分析方法<sup>[10-11]</sup>,可采用模糊改进的 TOPSIS 技术对 FMECA 中的不确定信息进行处理<sup>[12]</sup>。Braglia 提出的可靠性屋(HoR)<sup>[13]</sup>为解决考虑故障模式之间相关性情况下可靠性分析问题提供了一种可行的方法。本文应用基于模糊 TOPSIS 技术和 HoR 技术对 RPN 进行排序,识别风险影响较大的故障模式,从而提高 FMECA 在风险评估分析时的准确性与合理性。

### 1 模糊评价结构

#### 1.1 三角模糊数

**定义:** 若  $\tilde{A}=(a_L, a_M, a_H)$ , 其中  $0 < a_L \leq a_M \leq a_H$ , 则称  $\tilde{A}$  为一个三角模糊数,其几何图形如图 1 所示,其中  $[a_L, a_H]$  是支撑区间,  $(a_M, 1)$  是最大值。其隶属函数表达式为:

$$\mu(x) = F_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < a_L \\ \frac{x - a_L}{a_M - a_L}, & a_L \leq x \leq a_M \\ \frac{x - a_H}{a_M - a_H}, & a_M \leq x \leq a_H \\ 0, & x > a_H \end{cases} \quad (1)$$

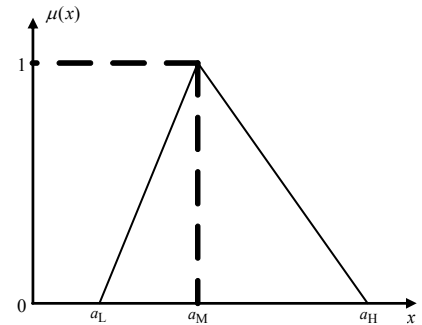


Fig.1 Triangular fuzzy number  
图 1 三角模糊数

#### 1.2 评价矩阵

评价人员从  $L$  个风险因素( $RF_1, RF_2, \dots, RF_L$ )方面对  $N$  个故障模式( $FM_1, FM_2, \dots, FM_N$ )进行评价。当风险因素从 3 个方面考虑时,  $L$  取 3, 通常( $RF_S, RF_O, RF_D$ )表示由故障模式的严酷度等级(S)、发生度等级(O)和检测度等级(D)所构成的风险因素评价指标集。在基于 3 个风险因素( $RF_S, RF_O, RF_D$ )考虑时,评价人员对故障模式( $FM_1, FM_2, \dots, FM_N$ )进行评价获得的评价值用  $X_j$  来表示,则评价人员对  $N$  个故障模式的评价信息,可用评价矩阵表示为:

$$X_{ij} = \begin{matrix} & RF_S & RF_O & RF_D \\ \begin{matrix} FM_1 \\ FM_2 \\ \vdots \\ FM_N \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{1S} & x_{1O} & x_{1D} \\ x_{2S} & x_{2O} & x_{2D} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{NS} & x_{NO} & x_{ND} \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (i=1,2,\dots,N; j=S,O,D) \quad (2)$$

若评价信息采用三角模糊数  $r_{ij}=(r_{ijL}, r_{ijM}, r_{ijH})$  进行表示,则式(2)称为模糊评价矩阵,采用式(3)对模糊评价矩阵进行规范处理,以消除不同物理量纲对评价结果的影响。

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\|x_j\|}, & \text{效益型} \\ \frac{1/x_{ij}}{\|1/x_j\|}, & \text{成本型} \end{cases} \quad (3)$$

$$\|x_j\| = \sqrt{\sum_{i=1}^N x_{ij}^2} \quad (4)$$

效益型指评价价值越大越好,成本型指评价价值越小越好。由此可得规范化矩阵  $R_{ij}$ :

$$R_{ij} = \begin{matrix} FM_1 \\ FM_2 \\ \vdots \\ FM_N \end{matrix} \begin{matrix} RF_S & RF_O & RF_D \\ \left[ \begin{matrix} r_{iS} & r_{iO} & r_{i3D} \\ r_{2S} & r_{2O} & r_{2D} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{NS} & r_{NO} & r_{ND} \end{matrix} \right] \end{matrix}, \quad (i=1,2,\dots,N; j=S,O,D) \quad (5)$$

1.3 模糊 TOPSIS 技术

根据 TOPSIS 理论，定义最危险的故障模式  $r^+$  和最不可能发生的故障模式  $r^-$  为：

$$r^+ = \{r_S^+, r_O^+, r_D^+\} = \{(r_{SL}^+, r_{SM}^+, r_{SH}^+), (r_{OL}^+, r_{OM}^+, r_{OH}^+), (r_{DL}^+, r_{DM}^+, r_{DH}^+)\} = \left\langle \left( \max_{i=1,2,\dots,N} r_{iSL}, \max_{i=1,2,\dots,N} r_{iSM}, \max_{i=1,2,\dots,N} r_{iSH} \right), \left( \max_{i=1,2,\dots,N} r_{iOL}, \max_{i=1,2,\dots,N} r_{iOM}, \max_{i=1,2,\dots,N} r_{iOH} \right), \left( \max_{i=1,2,\dots,N} r_{iDL}, \max_{i=1,2,\dots,N} r_{iDM}, \max_{i=1,2,\dots,N} r_{iDH} \right) \right\rangle \quad (6)$$

$$r^- = \{r_S^-, r_O^-, r_D^-\} = \{(r_{SL}^-, r_{SM}^-, r_{SH}^-), (r_{OL}^-, r_{OM}^-, r_{OH}^-), (r_{DL}^-, r_{DM}^-, r_{DH}^-)\} = \left\langle \left( \min_{i=1,2,\dots,N} r_{iSL}, \min_{i=1,2,\dots,N} r_{iSM}, \min_{i=1,2,\dots,N} r_{iSH} \right), \left( \min_{i=1,2,\dots,N} r_{iOL}, \min_{i=1,2,\dots,N} r_{iOM}, \min_{i=1,2,\dots,N} r_{iOH} \right), \left( \min_{i=1,2,\dots,N} r_{iDL}, \min_{i=1,2,\dots,N} r_{iDM}, \min_{i=1,2,\dots,N} r_{iDH} \right) \right\rangle \quad (7)$$

三角模糊数的距离测度公式为：

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^3 \left[ \left( \frac{r_{ijL} + r_{ijH}}{2} - \frac{r_{jL}^+ + r_{jH}^+}{2} \right)^2 + \frac{1}{3} \left( \frac{2r_{ijM} - r_{ijL} - r_{ijH}}{2} - \frac{2r_{jM}^+ - r_{jL}^+ - r_{jH}^+}{2} \right)^2 + \left( \frac{r_{ijL} + r_{ijH}}{2} - \frac{r_{jL}^+ + r_{jH}^+}{2} \right) \left( \frac{2r_{ijM} - r_{ijL} - r_{ijH}}{2} - \frac{2r_{jM}^+ - r_{jL}^+ - r_{jH}^+}{2} \right) + \frac{1}{36} (r_{ijH} - r_{ijL} - r_{jH}^+ + r_{jL}^+)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^3 \left[ \left( \frac{r_{ijL} + r_{ijH}}{2} - \frac{r_{jL}^- + r_{jH}^-}{2} \right)^2 + \frac{1}{3} \left( \frac{2r_{ijM} - r_{ijL} - r_{ijH}}{2} - \frac{2r_{jM}^- - r_{jL}^- - r_{jH}^-}{2} \right)^2 + \left( \frac{r_{ijL} + r_{ijH}}{2} - \frac{r_{jL}^- + r_{jH}^-}{2} \right) \left( \frac{2r_{ijM} - r_{ijL} - r_{ijH}}{2} - \frac{2r_{jM}^- - r_{jL}^- - r_{jH}^-}{2} \right) + \frac{1}{36} (r_{ijH} - r_{ijL} - r_{jH}^- + r_{jL}^-)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

式中： $S_i^+$  表示第  $i$  种故障模式距离  $r^+$  的程度，数值越小，表示该失效模式的风险程度越高； $S_i^-$  表示第  $i$  种故障模式距离  $r^-$  的程度，数值越小，表示该失效模式越不易出现。从而可得每种故障模式的相对影响度为：

$$\zeta_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (10)$$

相对影响度值越大，说明该故障模式风险越高，导致后果越严重。

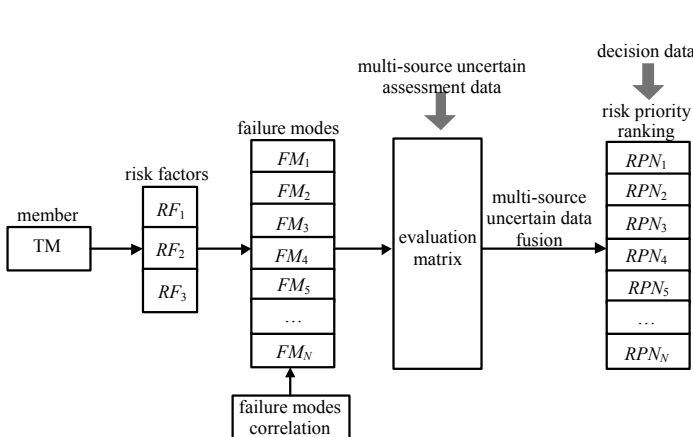


Fig.2 RPN evaluation method considering failure modes correlation  
图 2 考虑故障模式相关性的 RPN 评价思路

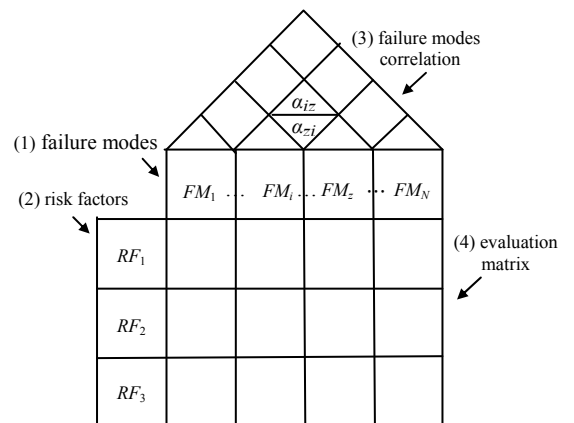


Fig.3 Basic structure of House of Reliability  
图 3 可靠性屋的基本结构

## 2 模糊信息下的 RPN 评价方法

### 2.1 评价方法思路

本方法通过开展故障模式相关性分析，对不确定信息进行模糊 RPN 排序，从而获得危害性最大的故障模式清单，具体的思路如图 2 所示。

### 2.2 基于可靠性屋的模糊 RPN 评价方法

故障模式的相关性可用可靠性屋的方式表现，如图 3 所示。可靠性屋的基本结构由 4 部分组成：

- 1) “故障模式”部分：包括各种潜在的故障模式；
- 2) “风险因素”部分：包括故障模式的严酷度等级(S)、故障模式的发生度等级(O)和故障模式的检测度等级(D)，参考表 1，用 1~10 表示；
- 3) “故障模式相关性”部分：表示故障模式之间的相互影响关系的大小。第  $i$  个故障模式的发生对第  $z$  个故障模式的影响大小可用  $\alpha_{iz}$  表示，对  $\alpha_{iz}$  的取值也建立了评分准则，如表 2 所示。

表1 S,O,D评价准则及评价等级  
Table1 Evaluation standards of severity, occurrence, detection and their ratings

severity of effect	probability of occurrence	likelihood of detection	rating
hazardous without warning	$\geq 1/2$	absolutely impossible	10
hazardous with warning	$\geq 1/3$	very remote	9
very high	$\geq 1/8$	remote	8
high	$\geq 1/20$	very low	7
moderate	$\geq 1/80$	low	6
low	$\geq 1/400$	moderate	5
very low	$\geq 1/2\ 000$	moderately high	4
minor	$\geq 1/15\ 000$	high	3
very minor	$\geq 1/150\ 000$	very high	2
none	$\leq 1/1\ 500\ 000$	almost certain	1

表2  $\alpha_{iz}$ 取值评分准则  
Table2 Scoring criteria of  $\alpha_{iz}$  value

correlation	criteria	taking value
very high	one failure mode is the direct cause of another	1.0
very high	one failure mode negatively affects the other	0.9
high	one failure mode is closely related to another	0.8
high	one failure mode is associated with another	0.7
moderate	one failure mode is moderately related to another	0.6
moderate	one failure mode can lead to another	0.5
low	there is a low correlation between one failure mode and the other	0.4
low	there is a very low correlation between one failure mode and the other	0.3
minor	one failure mode rarely leads to another	0.2
minor	one failure mode hardly affects the other	0.1
none	one failure mode has no effect on the other	0

4) “评价矩阵”部分：故障模式的评价信息用三角模糊数表示。若其中一个故障模式的三角模糊评价信息为  $r_i = (r_{i1}, r_{iM}, r_{i2})$ ，另一个为  $r_z = (r_{z1}, r_{zM}, r_{z2})$ ，第  $i$  个故障模式的发生对第  $z$  个故障模式的影响大小为  $\alpha_{iz}$ 。则考虑故障模式相关性后，第  $i$  个故障模式的三角模糊评价信息为：

$$r_i = (r'_{i1}, r'_{iM}, r'_{i2}) = (r_{i1} + \alpha_{iz}r_{z1}, r_{iM} + \alpha_{iz}r_{zM}, r_{i2} + \alpha_{iz}r_{z2}) \tag{11}$$

由式(11)可知，利用可靠性屋计算的 RPN 和传统的 RPN 的差别主要在于考虑了故障模式之间的相关性。

## 3 案例分析

### 3.1 气动薄膜调节阀的 FMECA 分析

文献[14]中，针对气动薄膜调节阀开展了 FMECA 分析，对每个故障模式的每种风险因素给出了确定性评价信息。若评价人员由于自身能力、对产品熟悉程度或对故障现象的认识水平等限制，无法对故障模式给出确定评价时，可采用模糊评价的方式，给出三角模糊数评价信息。结合表 1，气动薄膜调节阀 FMECA 分析评价信息见表 3。

文献[14]分析发现支架振动、导向套振动、阀杆弯曲和填料摩擦力太大这 4 个故障模式将会引起其他的故障模式。据此建立自相关矩阵  $A$ ，如表 4 所示，其中的相关系数  $\alpha_{iz}$  表示某一故障模式引起其他故障模式的可能性

大小。

结合表 3 和表 4，建立气动薄膜调节阀的可靠性屋，如图 4 所示。

表3 气动薄膜调节阀FMECA分析评价信息表

Table3 Deterministic evaluation information table for FMECA analysis of pneumatic thin film control valve

item	failure mode	deterministic evaluation information			triangular fuzzy number evaluation information		
		S	O	D	S	O	D
FM <sub>1</sub>	film rupture	6	5	4	(5,6,8)	(4,5,6)	(3,4,5)
FM <sub>2</sub>	sealing diaphragm poor sealing performance	5	4	4	(4,5,6)	(3,4,5)	(3,4,5)
FM <sub>3</sub>	bracket vibration	4	2	1	(3,4,5)	(1,2,3)	(1,1,2)
FM <sub>4</sub>	push rod bent or broken	8	1	1	(7,8,9)	(1,1,2)	(1,1,2)
FM <sub>5</sub>	spring deformation	7	3	5	(6,7,8)	(2,3,4)	(4,5,6)
FM <sub>6</sub>	spring seat fatigue fracture	5	1	2	(4,5,6)	(1,1,2)	(1,2,3)
FM <sub>7</sub>	valve body corrosion	4	1	7	(3,4,5)	(1,1,3)	(6,7,9)
FM <sub>8</sub>	loose seat	4	3	7	(3,4,5)	(2,3,4)	(6,7,8)
FM <sub>9</sub>	spool off	8	3	5	(7,8,10)	(2,3,4)	(4,5,6)
FM <sub>10</sub>	vibration of guide sleeve	4	2	3	(3,4,5)	(1,2,3)	(2,3,4)
FM <sub>11</sub>	leakage between bonnet and valve body	4	3	2	(3,4,5)	(2,3,4)	(1,2,3)
FM <sub>12</sub>	stem bend	8	4	5	(7,8,9)	(3,4,5)	(3,5,6)
FM <sub>13</sub>	stem connection disengaged or broken	5	5	1	(4,5,6)	(4,5,6)	(1,1,2)
FM <sub>14</sub>	too much friction	6	5	3	(4,6,8)	(4,5,6)	(2,3,5)
FM <sub>15</sub>	seal leak	4	8	3	(3,4,5)	(7,8,9)	(2,3,4)

表 4 故障模式相关性矩阵 A

Table4 Dependency matrix A of failure modes

failure modes	FM <sub>6</sub> spring seat fatigue fracture	FM <sub>9</sub> spool off	FM <sub>10</sub> vibration of guide sleeve	FM <sub>12</sub> stem bend	FM <sub>13</sub> stem connection disengaged or broken
FM <sub>3</sub> bracket vibration	0.2	0.1	0.5	0	0.3
FM <sub>10</sub> vibration of guide sleeve	0.1	0.3	1	0	0.1
FM <sub>12</sub> stem bend	0	0	0	1	0.3
FM <sub>14</sub> too much friction	0	0	0	0.1	0.1

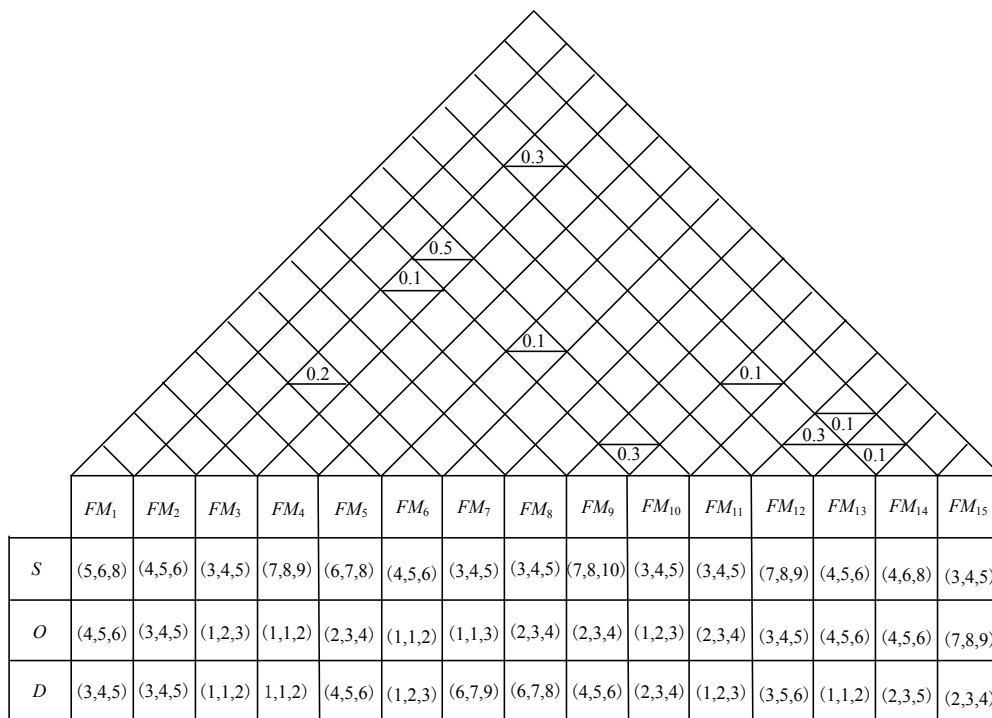


Fig.4 House of Reliability of pneumatic thin film control valve

图 4 气动薄膜调节阀的可靠性屋

### 3.2 结果比较

本文将 3 种方法获得的 RPN 排序结果进行比较，第 1 种按照传统 FMECA 方法，不考虑故障模式相关性得到的 RPN 排序结果；第 2 种考虑故障模式相关性，对三角模糊数进行去模糊化处理<sup>[15]</sup>获得去模糊化后的 RPN 排序结果；第 3 种采用本文所述的方法，考虑故障模式相关性后采用模糊 TOPSIS 技术获得的 RPN 排序结果。排

序结果如图5所示。

从图5可以看出,传统FMECA中不同的S、O和D会得出相同的RPN评价结果,因此传统RPN经常会出现故障模式排序相等的情况。采用三角模糊数评价信息,在考虑了故障模式相关性的基础上,对模糊评价信息进行去模糊化处理获得RPN排序的方法,大大降低了相同序列故障模式的出现,并将 $FM_3, FM_{10}, FM_{13}$ 对其他故障造成的影响进行了识别,三者风险优先数排序结果都较传统方法有所提升。采用模糊TOPSIS技术对RPN进行排序的方法,进一步降低了相同序列故障模式的出现,并将会影响其他故障模式发生的故障模式的风险进一步识别出来。如 $FM_3$ 对 $FM_6, FM_9, FM_{10}, FM_{13}$ 都造成影响,传统RPN方法认为其风险排序为14,去模糊化RPN方法认为其风险排序应为10,而模糊TOPSIS的RPN方法认为其风险排序应为2。在工程实际中,某些故障模式本身RPN值低,但因其存在连锁反应,造成实际风险程度较高,采用该方法对故障模式的风险程度进行识别,可以更合理地反映各故障模式的危害性大小。

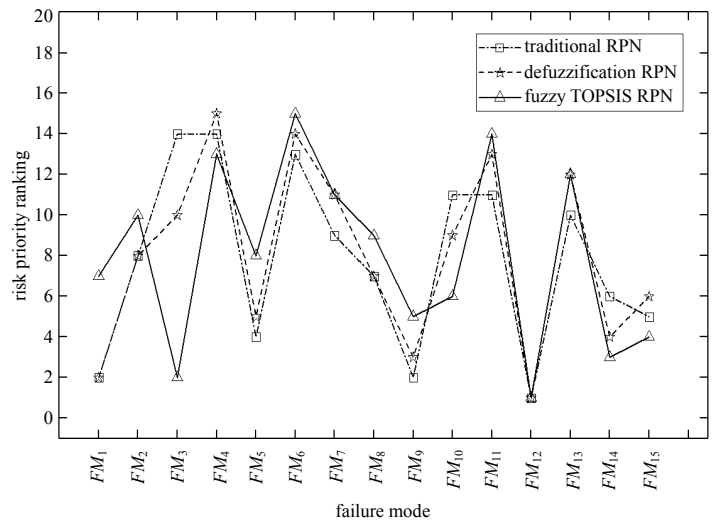


Fig.5 Comparison results of different methods  
图5 3种方法计算结果对比

#### 4 结论

本文在总结传统FMECA方法不足的基础上,提出了一种基于故障模式相关性的模糊RPN评价方法,可有效利用FMECA中的评价人员评价信息的不确定性和故障模式的相关性,采用模糊TOPSIS技术识别那些本身RPN值低,但会对其他故障模式造成影响,从而导致其风险程度大大提高的故障模式。对识别出的风险优先数高的故障模式,应针对性地提出重点风险应对措施:如尽可能地增加测试手段对其进行检测,确实无法检测的,应加强在结构设计、材料选用、加工、零部件质量检验和装配等整个过程中的质量控制措施。实例表明,基于HoR和TOPSIS技术的模糊风险评价方法是对传统RPN评价方法的有效优化,可使评价过程更符合实际,评价结果更合理可信,为产品设计、可靠性提升提供重要参考依据,为切实发挥FMECA的故障模式风险评估作用提供一种新思路。

#### 参考文献:

- [1] CHANG K H, CHENG C H. Evaluating the risk of failure using the fuzzy OW and DEMATEL method[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2011(22):113-129.
- [2] KUTLU A C, EKMEKÇIOĞLU M. Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(1):61-67.
- [3] 杜恩祥, 王玮, 常雷. 基于FMECA的装备健康状态评估方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2013, 27(2):25-27. (DU Enxiang, WANG Wei, CHANG Lei. Assessment method of equipment health condition based on FMECA[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2013, 27(2):25-27.)
- [4] 马勇, 马建峰, 孙聪, 等. 飞行控制系统组件化故障模式与影响分析方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(2):174-179. (MA Yong, MA Jianfeng, SUN Cong, et al. Component-based failure mode and effect analysis for flight control systems[J]. Journal of Xidian University, 2016, 43(2):174-179.)
- [5] 杨丽梅, 蔡长亮, 徐楠. 基于模糊综合评判与FMEA的数控机床故障分析[J]. 机床与液压, 2015, 43(15):197-206. (YANG Limei, CAI Changliang, XU Nan. Fault analysis of CNC machine tool based on fuzzy comprehensive evaluation and FMEA methods[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(15):197-206.)
- [6] CHIN K S, WANG Y M, POON G K K, et al. Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach[J]. Computers & Operations Research, 2009, 36(6):1768-1779.
- [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 ] 苏杭,钱伟懿. 基于 TOPSIS 的模糊数直觉模糊多属性决策法[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2012,33(1):6-10. (SU Hang,QIAN Weiyi. TOPSIS method for multiple attribute decision-making with fuzzy number intuitionistic fuzzy information[J]. Journal of Bohai University(Natural Science Edition), 2012,33(1):6-10.)
- [ 9 ] 顾翠伶,梁艳艳,张茜. 三角模糊数型模糊多属性群决策方法[J]. 周口师范学院学报, 2015,32(5):36-41. (GU Cuiling, LIANG Yanyan,ZHANG Qian. Fuzzy multi-attribute group decision-making based on triangular fuzzy numbers[J]. Journal of Zhoukou Normal University, 2015,32(5):36-41.)
- [10] 杜哈恒,彭翀. 基于模糊 TOPSIS 的 FMECA 方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016,42(5):368-374. (DU Hanheng,PENG Chong. Failure mode and effects analysis method based on fuzzy TOPSIS[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016,42(5):368-374.)
- [11] 孙丽萍,康济川,刘子健,等. 海上风机的模糊关联失效模式及其影响分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016,37(4):487-491. (SUN Liping,KANG Jichuan,LIU Zijian,et al. Fuzzy theory-based correlated FMEA of offshore wind turbines[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016,37(4):487-491.)
- [12] 伍晓榕,裘乐森,张树有,等. 模糊语境下的复杂系统关联 FMEA 方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013,47(5):782-789. (WU Xiaorong,QIU Lemiao,ZHANG Shuyou,et al. Correlated FMEA method of complex system with linguistic vagueness[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2013,47(5):782-789.)
- [13] BRAGLIA M,FANTONI G,FROSOLINI M. The house of reliability[J]. International Journal of Quality and Reliability Management, 2007,24(4):420-440.
- [14] 石洁,包士毅. 基于 FMECA/HoR 的气动薄膜调节阀可靠性分析[J]. 轻工机械, 2013,31(5):45-50. (SHI Jie,BAO Shiyi. FMECA/HoR analysis for pneumatic diaphragm control valve[J]. Light Industry Machinery, 2013,31(5):45-50.)
- [15] 冉静学. 三角模糊数排序方法的研究[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2011,20(4):37-42. (RAN Jingxue. The research of the rank of triangular fuzzy numbers[J]. Journal of Minzu University of China(Natural Sciences Edition), 2011,20(4):37-42.)

#### 作者简介:

李君雅(1982-),女,河南省洛阳市人,硕士,助理研究员,主要研究方向为故障模式影响与分析、不确定性信息处理等. email:ayalee@foxmail.com.

锁 斌(1979-),男,陕西省汉中市人,博士,副研究员,主要研究方向为贮存可靠性、不确定性信息处理等研究.

王 琳(1982-),男,河南省南阳市人,硕士,副研究员,主要研究方向为系统工程总体设计、系统测试及数据分析处理等.

卢 欣(1979-),女,四川省绵阳市人,硕士,副研究员,主要研究方向为数字信号处理、信息系统、电子电路分析等.