http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2015.0088

基于模糊 TOPSIS 的 FMEA 方法

杜晗恒，彭翀*
（北京航空航天大学 机械工程及自动化学院，北京 100083）

摘 要：针对传统故障模式及影响分析(FMEA)中评价故障模式的影响因素和计算风险优先数存在的缺陷，提出了一种基于模糊逼近理想解排序法(TOPSIS)的 FMEA 方法。该方法采用模糊置信结构对影响因素的评价进行表示，并通过去模糊化和加权平均建立明确置信矩阵。考虑各影响因素的权重对分析结果的重要性，将主、客观赋权法相结合来分配各影响因素的权重，进而建立加权规范化矩阵，根据相对贴近度的大小确定各故障模式的风险水平。最后，举例验证了该方法的可行性和有效性。

关 键 词：模糊置信结构；影响因素；逼近理想解排序法(TOPSIS)；故障模式及影响分析(FMEA)；风险水平
中图分类号：V221+.3；TB553
文献标识码：A **文章编号**：1001-5965(2016)02-0368-07

故障模式及影响分析(Failure Mode and Effects Analysis，FMEA)是一种分析系统中每个产品潜在的故障模式及其对系统造成的影响，并按每一种故障模式的发生概率(Occurrence，O)、严重程度(Severity，S)和检测难易程度(Detection，D)予以分类的归纳分析方法[1]。传统的 FMEA 采用风险优先数(Risk Priority Number，RPN)来表示故障模式造成的影响即风险水平的高低，从而有针对性地提出预防或改进措施，以保证系统的可靠性。每个影响因素(O、S 和 D)有 10 个等级，RPN 值由 3 个影响因素的等级数相乘确定，RPN 值越大，说明该故障模式的风险水平越高，对系统的危害性越大[2]。但传统的 FMEA 方法在实践中存在以下问题[3]：

1) 影响因素(O、S 和 D)相邻等级之间差距很小，评估人员很难判定其所属等级数。

2) 传统 FMEA 没有考虑影响因素各自的权重，如对于不可修复系统来说，发生概率 O 是关键的影响因素，其权重不能与严重程度 S 和检测难易程度 D 等同。

3) RPN 值的计算方法存在一定的争议，因为一个影响因素很小的变动，可能造成 RPN 值相差很大。如 2 个故障模式的 O、S 和 D 等级数分别为 1、9、9 和 2、9、9，则它们的 RPN 值分别为 81 和 162，相差 2 倍，但由于是发生概率的微小不同，可能对系统的危害相差不大。

为解决传统 FMEA 存在的缺陷，国内外学者提出了很多改进方法。Pillay 和 Wang[3]引入模糊规则库和灰色关联理论对风险水平不同但 RPN 值相同的故障模式进行分级，并运用去模糊语义值和灰色关联度确定最终的排序。Wang 等[4]提出了模糊 RPN 的分析方法，通过模糊语言对每一个故障模式的影响因素进行评价，并使用模糊加权几何平均法对 RPN 进行计算。Gargama 和 Chaturvedi[5]也采用模糊语言变量表示评价专家对 3 个影响因素的评价，并通过匹配程度来评估

收稿日期：2015-02-09；**录用日期**：2015-03-27；**网络出版时间**：2015-04-28 10:16
网络出版地址：www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20150428.1016.001.html
基金项目：国家重大科技专项(2010ZX04014-017)；中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-14-JXXY-004)
* **通讯作者**：Tel.：010-82316298 E-mail：pch@buaa.edu.cn

引用格式：*杜晗恒，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).

http://bhxb.buaa.edu.cn

评价信息与模糊数的匹配情况,应用 alpha 水平集来计算模糊 RPN。Chin 等[6]考虑评估信息的不确定性,采用模糊证据推理对故障模式的影响因素进行评估,对各故障模式的风险水平排序时未考虑各影响因素的权重。Liu 等[7]提出了基于模糊证据推理和灰色理论的 FMEA 方法,但在确定影响因素权重时未考虑影响因素本身的客观信息。Garcia 和 Schirru[8]利用模糊数据包络分析理论对故障模式的风险水平进行排序。王贵宝等[9]利用于信息熵定理和最大信息熵推论,研究了影响因素和权重分配问题,提出了风险可能数。逼近理想解排序法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution,TOPSIS)作为一种多指标综合评价的排序方法,在 FMEA 中也得到了应用发展。Kutlu 和 Ekmekcioğlu[10]将模糊理论与 TOPSIS 相结合对 FMEA 进行分析,并使用模糊层次分析法(Analytical Hierarchy Process,AHP)分配影响因素的权重,但模糊 AHP 确定权重时,一方面影响因素的权重相对比较时存在不确定性,不利于评价专家评定,另一方面也忽略了影响因素本身存在的客观信息。Braglia 等[11]也引入 TOPSIS 对 FMEA 中风险优先数进行分析,并举例验证了该方法的实用性,但未解决各影响因素评价中存在模糊性问题。

综合以上研究,本文将模糊证据推理和 TOPSIS相结合,提出了模糊 TOPSIS 的 FMEA 方法。既解决了影响因素难以评价的问题,又通过 TOPSIS的相对贴近度避免了传统 FMEA 中影响因素相乘带来的缺陷。此外,通过主观赋权法和客观赋权法相结合的方法来分配各影响因素的权重,不仅融合了评价专家的经验知识,而且考虑了影响因素本身的客观信息,使得权重分配更加合理。

1　提出的 FMEA 方法

1.1　模糊置信结构

设模糊语言变量 $H_{ii}(i=1,2,\cdots,5)$ 构成的评价集为:$H=\{H_{11},H_{22},H_{33},H_{44},H_{55}\}=\{\mathrm{VL},\mathrm{L},\mathrm{M},\mathrm{H},\mathrm{VH}\}$[11],其中:VL 表示很低;L 表示低;M 表示中;H 表示高;VH 表示很高。模糊语言变量对各影响因素的评定准则及对应的模糊数如表 1 所示[3]。

设评估小组中有 K 名评价人员($T_1,T_2,\cdots,T_k,\cdots,T_K$)对 N 个故障模式($F_{\mathrm{M1}},F_{\mathrm{M2}},\cdots,F_{\mathrm{M}n}\cdots,F_{\mathrm{M}N}$)关于 O、S 和 D 这 3 个影响因素(分别用 E_{F1}、E_{F2} 和 E_{F3} 表示)进行评价,用 $\{(H_{ij},\alpha_{ij}^{k}(F_{\mathrm{M}n},E_{\mathrm{F}l}))\}(i>j;i=1,2,\cdots,5;j=1,2,\cdots,5;k=1,2,\cdots,K;n=1,2,\cdots,N;l=1,2,3)$ 表示评价结果,这种表示形式称为模糊置信结构,$\alpha_{ij}^{k}(F_{\mathrm{M}n},E_{\mathrm{F}l})$ 为相对应的置信度[12]。

1) 如评价等级“L”可表示为 $\{(H_{22},1.0)\}$。

2) 如果评价中认为“VL”可能性为 40%,“L”可能性为 60%,可用 $\{(H_{11},0.4),(H_{22},0.6)\}$ 表示;如果置信度之和不为 1,如 $\{(H_{11},0.3),(H_{22},0.6)\}$,丢失的 10% 为局部无法评价,可分配到“VL”到“VH”的任何等级。

3) 当无法确定置信度时,如认为某影响因素在“VL”到“L”之间时,可用 $\{(H_{12},1.0)\}$ 表示。

用 $\tilde{x}_n=\{(H_{ij},\alpha_{ij}(F_{\mathrm{M}n},E_{\mathrm{F}l}))\}$ 表示所有评价人员对故障模式 $F_{\mathrm{M}n}$ 的影响因素 $E_{\mathrm{F}l}$ 评价的综合,称为综合置信结构,对应置信度的计算公式为

$$\alpha_{ij}(F_{\mathrm{M}n},E_{\mathrm{F}l})=\sum_{k=1}^{K}\lambda_k\alpha_{ij}^{k}(F_{\mathrm{M}n},E_{\mathrm{F}l}) \tag{1}$$

式中:λ_k 为评价人员的权重,$\sum_{k=1}^{K}\lambda_k=1$。

表 1　模糊语言变量的评定准则及对应的模糊数

Table 1　Evaluation standards of fuzzy linguistic terms and their fuzzy scores

评价等级	发生概率 O 评定准则	严重程度 S 评定准则	检测难易程度 D 评定准则	模糊数
VL	几乎不会发生故障	对设备运行几乎无影响	可根据故障现象直接断定	(0,1,1,2)
L	较少发生故障	需维修,但不影响设备性能	简单的检查可发现故障	(1,2,3,4)
M	偶尔发生故障,接下来会偶尔发生的故障	设备性能下降,但可以运行	经现行检测技术才可发现故障	(3,4,6,7)
H	有时候发生,接下来会反复发生的故障	设备性能基本丧失,无法运行	经现行检测技术较难发现故障	(6,7,8,9)
VH	经常发生,接下来必然发生的故障	引起人员伤亡或设备严重损坏	现行检测技术无法发现故障	(8,9,10,10)

http://bhxb.buaa.edu.cn

1.2 建立明确置信矩阵

根据综合置信结构 $\tilde{x}_n$,通过反模糊化和加权平均的方法建立明确置信矩阵。Chen 和 Klein[13] 提出了一种简便的去模糊化方法,即

$$h_{ij}=\frac{\sum_{p=0}^{1}(b_p-c)}{\sum_{p=0}^{1}(b_p-c)-\sum_{p=0}^{1}(a_p-d)} \tag{2}$$

式中:h_{ij}为 H_{ij}去模糊化后的明确值。

由模糊语言变量的模糊数知 $c=0,d=10$,其余参数取值如图 1 所示,按式(2)将各模糊评价等级去模糊化后明确值如表 2 所示。

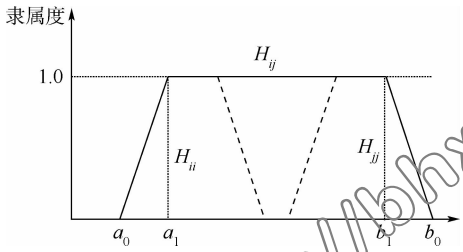


图 1 评价等级去模糊化

Fig. 1 Defuzzification of evaluation grade

表 2 各评价等级的明确值

Table 2 Clear values of evaluation grades

评价等级	h_{ij}	评价等级	h_{ij}	评价等级	h_{ij}
H_{11}	0.130	H_{12}	0.295	H_{24}	0.500
H_{22}	0.292	H_{13}	0.394	H_{25}	0.541
H_{33}	0.500	H_{14}	0.459	H_{34}	0.567
H_{44}	0.708	H_{15}	0.500	H_{35}	0.606
H_{55}	0.870	H_{23}	0.433	H_{45}	0.741

故障模式 $F_{\mathrm{M}n}$关于影响因素 $E_{\mathrm{F}l}$的明确值,可由式(3)加权平均得到:

$$x_n(l)=\sum_{i=1}^{5}\sum_{j=1}^{5}h_{ij}\alpha_{ij}(F_{\mathrm{M}n},E_{\mathrm{F}l}) \tag{3}$$

那么,所有 $x_n(l)$构成明确置信矩阵:

$$\boldsymbol{X}=\begin{array}{c} \\ F_{\mathrm{M}1}\\ F_{\mathrm{M}2}\\ \vdots\\ F_{\mathrm{M}N}\end{array}\begin{array}{c}\begin{array}{ccc}\mathrm{O} & \mathrm{S} & \mathrm{D}\end{array}\\ \begin{bmatrix}x_1(1) & x_1(2) & x_1(3)\\ x_2(1) & x_2(2) & x_2(3)\\ \vdots & \vdots & \vdots\\ x_N(1) & x_N(2) & x_N(3)\end{bmatrix}\end{array} \tag{4}$$

1.3 建立加权规范化矩阵

首先,对明确置信矩阵用向量规范化法构造规范化矩阵[14]:

$$\boldsymbol{R}=(r_{nl})_{N\times 3} \tag{5}$$

式中:$r_{nl}=\dfrac{x_n(l)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N}x_n^2(l)}}$,$n\in N,l=1,2,3$。

然后,构建加权规范化矩阵:

$$\boldsymbol{Z}=(z_{nl})_{N\times 3} \tag{6}$$

式中:$z_{nl}=w_l r_{nl}$。

由于各影响因素的权重 w_l 是 FMEA 分析的关键。本文将主观赋权法和客观赋权法相结合分配各权重,主观赋权法采用专家评价的方法,客观赋权法采用熵权法。

1)主观赋权法计算影响因素权重

对各权重的评价如第 1.1 节和第 1.2 节所述。但在构建模糊置信矩阵时,其模糊语言变量对应的模糊数不同,影响因素权重的评价等级及对应的模糊如表 3 所示[4]。

设 $w_l^{\mathrm{S}}(l=1,2,3)$为计算得到的明确置信矩阵,为使得权重之和为 1,按式(7)将其归一化,得到主观赋权法分配的影响因素权重 $\bar{w}_l^{\mathrm{S}}(l=1,2,3)$。

$$\bar{w}_l^{\mathrm{S}}=\frac{w_l^{\mathrm{S}}}{\sum_{l=1}^{3}w_l^{\mathrm{S}}} \tag{7}$$

表 3 影响因素权重的评价等级及对应的模糊数

Table 3 Evaluation grades of effect factor's weights and their fuzzy scores

评价等级	模糊数
非常重要	(0,0,0.25)
重要	(0,0.25,0.5)
中	(0.25,0.5,0.75)
次要	(0.5,0.75,1)
非常次要	(0.75,1,1)

2)客观赋权法计算影响因素权重

熵权法是根据多属性决策问题中的数据确定信息熵,信息熵越小,信息的无序度越低,其信息的效用值越大,影响因素的权重越大。因此,熵权法是一种客观赋权法,其完全取决于数据,计算过程如下[15]。

定义第 l 个影响因素的熵为

$$H_l=-k\sum_{n=1}^{N}(f_{nl}\ln(f_{nl})) \tag{8}$$

式中:

$$\begin{cases}f_{nj}=r_{nl}\Big/\sum_{n=1}^{N}r_{nl}\\ k=1/\ln N\end{cases} \tag{9}$$

其中:$n=1,2,\cdots,N$,N 为故障模式的总数;$l=1,2,3$。

确定熵权,即各影响因素的权重为

$$w_l^{\mathrm{O}}=\frac{1-H_l}{3-\sum_{l=1}^{3}H_l} \tag{10}$$

3)综合度量各影响因素的权重

采用合成的方法将主、客观 2 种权重结合起

http://bhxb.buaa.edu.cn

来。常见的合成方法有线性加权合成法、乘法合成法、混合法和代换法[16]。由于各影响因素权重的数值差距较大,本文采用乘法合成法来综合度量各影响因素的权重,即

$$w_l = \frac{w_l^{\mathrm{O}} \bar{w}_l^{\mathrm{S}}}{\sum_{l=1}^{3} w_l^{\mathrm{O}} \bar{w}_l^{\mathrm{S}}} \qquad l = 1,2,3 \tag{11}$$

1.4　计算相对贴近度

首先,确定正理想解 A^+ 和负理想解 A^-:

$$A^+ = (z_1^+, z_2^+, z_3^+)$$

$$A^- = (z_1^-, z_2^-, z_3^-)$$

式中:

$$\begin{cases} z_l^- = \min\{z_{nl}\} \\ z_l^+ = \max\{z_{nl}\} \end{cases} \tag{12}$$

其次,采用欧氏距离公式计算各故障模式到正理想解和负理想解的距离:

$$\begin{cases} d_n^+ = \|z_{nl} - A^+\| = \sqrt{\sum_{l=1}^{3} (z_{nl} - z_l^+)^2} \\ d_n^- = \|z_{nl} - A^-\| = \sqrt{\sum_{l=1}^{3} (z_{nl} - z_l^-)^2} \end{cases} \tag{13}$$

然后,计算各故障模式的相对贴近度 C_n:

$$C_n = \frac{d_n^-}{d_n^+ + d_n^-} \qquad n = 1,2,\cdots,N \tag{14}$$

最后,根据相对贴近度递减顺序对各故障模式的风险水平进行排序,排序最前的便是对系统危害性最大的。

2　实例应用

本文以数控系统为例,检验该 FMEA 方法的可行性和有效性。根据文献[17]可知数控系统的主要故障模式为:线路、电缆短路(F_{M1}),线路、电缆断路(F_{M2}),元器件损坏(F_{M3}),元器件松动(F_{M4}),过载(F_{M5}),操作系统失灵(F_{M6}),可编程逻辑控制器(PLC)控制模块失调(F_{M7}),计算机数字控制机床(CNC)参数设定错误(F_{M8}),程序丢失(F_{M9})。对数控系统进行 FMEA 时,其评估小组涵盖设计、制造、运行和维修等不同部门专家,文献[18]考虑不同评价人员的职称、工龄、学历和年龄不同导致的知识经验不同,计算得出各评价人员权重 λ_n 分别为:0.10,0.30,0.25,0.15,0.20。该 FMEA 方法在数控系统中的分析过程如下:

1) 用模糊置信结构表示评价人员对所有故障模式影响因素的评价,见表 4。

2) 结合表 2 和表 4,按式(1)和式(3)建立明确置信矩阵,见表 5。

表 4　所有故障模式影响因素的评价信息

Table 4　Evaluation information of all failure modes' effect factors

影响因素	T_i	故障模式								
		F_{M1}	F_{M2}	F_{M3}	F_{M4}	F_{M5}	F_{M6}	F_{M7}	F_{M8}	F_{M9}
O	T_1	H_{33}	$(H_{13},1.0)$	$(H_{45},0.9)$	H_{44}	$(H_{34},1.0)$	$(H_{33},0.9)$ $(H_{44},0.1)$	H_{44}	$(H_{22},0.8)$ $(H_{33},0.2)$	H_{22}
	T_2	H_{33}	H_{22}	H_{55}	$(H_{33},0.8)$	$(H_{34},1.0)$	$(H_{34},1.0)$	H_{44}	$(H_{22},0.9)$	H_{22}
	T_3	$(H_{34},1.0)$	$(H_{34},1.0)$	$(H_{44},0.8)$ $(H_{55},0.2)$	H_{33}	H_{22}	H_{33}	$(H_{25},0.9)$	H_{33}	H_{11}
	T_4	H_{33}	$(H_{12},1.0)$	H_{44}	$(H_{33},0.8)$ $(H_{44},0.2)$	$(H_{34},1.0)$	H_{33}	$(H_{34},1.0)$	H_{22}	$(H_{12},1.0)$
	T_5	H_{33}	H_{22}	H_{55}	H_{33}	H_{22}	H_{33}	H_{44}	$(H_{12},0.9)$	$(H_{12},0.8)$
S	T_1	H_{22}	$(H_{12},1.0)$	H_{44}	$(H_{14},1.0)$	H_{33}	$(H_{15},1.0)$	$(H_{24},0.9)$	$(H_{13},0.9)$	H_{22}
	T_2	H_{33}	H_{22}	H_{44}	H_{33}	$(H_{23},1.0)$	H_{33}	$(H_{45},0.9)$	H_{22}	H_{11}
	T_3	H_{22}	$(H_{12},1.0)$	H_{44}	H_{33}	H_{22}	$(H_{34},0.9)$	H_{44}	H_{33}	$(H_{12},1.0)$
	T_4	H_{33}	H_{22}	H_{44}	$(H_{22},0.9)$	H_{33}	H_{33}	H_{33}	$(H_{23},1.0)$	H_{11}
	T_5	H_{22}	H_{22}	$(H_{45},1.0)$	H_{33}	H_{22}	H_{33}	H_{44}	H_{22}	H_{22}
D	T_1	H_{22}	H_{22}	H_{22}	H_{22}	$(H_{12},1.0)$	H_{22}	H_{22}	$(H_{13},1.0)$	H_{12}
	T_2	H_{33}	$(H_{12},1.0)$	$(H_{12},1.0)$	H_{22}	H_{22}	$(H_{23},1.0)$	$(H_{13},1.0)$	H_{22}	H_{11}
	T_3	$(H_{13},1.0)$	$(H_{12},1.0)$	$(H_{11},0.7)$ $(H_{22},0.3)$	$(H_{23},0.9)$	H_{22}	H_{22}	H_{22}	H_{22}	$(H_{12},0.2)$ $(H_{22},0.8)$
	T_4	H_{22}	H_{22}	H_{22}	$(H_{23},1.0)$	$(H_{12},1.0)$	H_{33}	$(H_{23},1.0)$	H_{22}	H_{22}
	T_5	H_{33}	$(H_{12},1.0)$	$(H_{12},1.0)$	H_{22}	H_{22}	H_{22}	$(H_{22},0.7)$ $(H_{23},0.3)$	$(H_{12},1.0)$	$(H_{12},1.0)$

http://bhxb.buaa.edu.cn

表5 各影响因素的明确置信矩阵

Table 5 Clear belief matrix of all effect factors

故障模式	O	S	D
F_{M1}	0.517	0.386	0.422
F_{M2}	0.371	0.293	0.294
F_{M3}	0.798	0.715	0.265
F_{M4}	0.527	0.465	0.350
F_{M5}	0.443	0.386	0.293
F_{M6}	0.522	0.453	0.366
F_{M7}	0.635	0.517	0.352
F_{M8}	0.359	0.376	0.303
F_{M9}	0.253	0.220	0.244

3) 根据式(5)将明确置信矩阵用向量规范化法构造规范化矩阵,见表6。

表6 各影响因素的规范化矩阵

Table 6 Normalized matrix of all effect factors

故障模式	O	S	D
F_{M1}	0.112	0.084	0.187
F_{M2}	0.058	0.048	0.091
F_{M3}	0.267	0.288	0.074
F_{M4}	0.116	0.122	0.129
F_{M5}	0.082	0.084	0.090
F_{M6}	0.114	0.116	0.141
F_{M7}	0.169	0.151	0.130
F_{M8}	0.054	0.080	0.096
F_{M9}	0.027	0.027	0.063

4) 确定各影响因素的权重

首先,用主观赋权法确定各影响因素的权重:评价人员对各影响因素权重的评价信息见表7;同本节1)和2),可得到明确置信矩阵(w_1^S, w_2^S, w_3^S) = (0.660,0.214,0196);根据式(7)将其归一化得:($\bar{w}_1^S$, $\bar{w}_2^S$, $\bar{w}_3^S$) = (0.617,0.200,0.183)。

表7 各影响因素权重的评价信息

Table 7 Evaluation information of effect factor's weights

T_i	O	S	D
T_1	$\{H_{44},1.0\}$	$\{H_{22},0.6\ H_{33},0.4\}$	$\{H_{11},1.0\}$
T_2	$\{H_{45},1.0\}$	$\{H_{33},1.0\}$	$\{H_{22},1.0\}$
T_3	$\{H_{33},0.4\}$ $\{H_{44},0.6\}$	$\{H_{34},1.0\}$	$\{H_{22},1.0\}$
T_4	$\{H_{45},1.0\}$	$\{H_{33},1.0\}$	$\{H_{11},1.0\}$
T_5	$\{H_{33},0.9\}$	$\{H_{23},1.0\}$	$\{H_{12},1.0\}$

然后,根据式(8)~式(10)可得客观赋权法确定的权重为 w_l^O = (0.424,0.448,0.128)。

最后,按式(11)计算综合度量后各影响因素的权重为 w_l = (0.698,0.239,0.063)。

5) 根据式(6)和式(12)~式(14)可得各故障模式到正理想解和负理想解的距离 d_i^+、d_i^-、相对贴近度 C_i 和 C_i 排序如表8所示。

表8 各故障模式的 d_i^+、d_i^-、C_i 和 C_i 排序

Table 8 d_i^+、d_i^-、C_i and rank of C_i for all failure modes

故障模式	d_i^+	d_i^-	C_i	排序
F_{M1}	0.118	0.061	0.341	5
F_{M2}	0.157	0.022	0.122	8
F_{M3}	0.007	0.178	0.960	1
F_{M4}	0.112	0.066	0.371	3
F_{M5}	0.138	0.041	0.228	6
F_{M6}	0.114	0.064	0.361	4
F_{M7}	0.076	0.103	0.577	2
F_{M8}	0.157	0.022	0.125	7
F_{M9}	0.179	0.001	0.003	9

根据 C_i 排序得出数控系统各故障模式的风险水平从高到低的排序为:$F_{M3} > F_{M7} > F_{M4} > F_{M6} > F_{M1} > F_{M5} > F_{M8} > F_{M2} > F_{M9}$,可以看出风险水平最高的是元器件损坏,对数控系统的危害性最大,其次是PLC控制模块失调,危害性最小的是程序丢失。

为了验证本文所提FMEA方法的优越性,采用传统的FMEA方法进行对比。传统FMEA方法采用RPN值来表示各故障模式风险水平的高低,其对数控系统的分析结果如表9所示,根据RPN值大小进行各故障模式风险水平的排序为 $F_{M3} > F_{M7} > F_{M4} > F_{M6} > F_{M1} = F_{M5} > F_{M8} > F_{M2} = F_{M9}$。通过结果可以看出,传统FMEA方法分析得到的故障模式 F_{M1}(线路、电缆短路)与故障模式 F_{M5}(过载)风险水平相同,故障模式 F_{M2}(线路、电缆断路)与故障模式 F_{M9}(程序丢失)风险水平相同,而现实中它们各自对数控系统的影响不同,究其原因是由于传统FMEA方法通过RPN值分析风险水平,虽然各故障模式3个影响因素O、S和D的等级数不同,但是相乘后可能造成RPN值相同即风险水平相同,本文通过TOPSIS中相对贴近度对各故障模式进行风险水平排序,有效地解决了此问题。

表9 传统FMEA方法对各故障模式风险水平的分析

Table 9 Analysis on risk level of failure mode using traditional FMEA method

故障模式	O	S	D	RPN
F_{M1}	4	8	3	96
F_{M2}	4	3	4	48
F_{M3}	9	8	5	360
F_{M4}	8	8	3	192
F_{M5}	4	6	4	96
F_{M6}	5	6	4	120
F_{M7}	7	7	4	196
F_{M8}	3	7	3	63
F_{M9}	2	6	4	48

http://bhxb.buaa.edu.cn

3　结　论

本文在总结传统 FMEA 方法存在不足的基础上,提出了一种基于模糊 TOPSIS 的 FMEA 方法,并结合实例应用研究得出以下结论:

1) 采用模糊置信结构$\{(H_{ij},\alpha_{ij}^{k}(F_{Mn},E_{Fl}))\}$ $(i>j;i=1,2,\cdots,5;j=1,2,\cdots,5;l=1,2,3;k=1,2,\cdots,K;n=1,2,\cdots,N)$表达各故障模式影响因素的评价,并且评价人员根据自身知识经验给予不同的评价信息,从而将专家知识和经验引入 FMEA 过程,提高了分析的准确性。

2) 考虑研究对象的不同会引起各影响因素之间的相对重要性不同,将专家评价确定的各影响因素的权重和客观赋权法计算得到的权重相结合,综合分配各影响因素的权重,使得 FMEA 更加合理。

3) 根据 TOPSIS 的相对贴近度 C_i 对各故障模式的风险水平进行排序,避免了因出现相同的 RPN 值而导致不能判断风险水平高低的现象,也解决了传统 FMEA 通过影响因素相乘带来的问题。

4) 应用该 FMEA 方法对数控系统进行了分析,分析结果表明元器件损坏风险水平最高,对数控系统的危害性最大,在数控系统的设计、制造和使用中应重点关注,如:在数控系统的设计阶段,应注意元器件的选择、采购与验收;在数控系统使用阶段,应加强元器件的维护,做好相应的预防性维修措施,以提高数控系统的可靠性和可用性。

参考文献 (References)

[1] 陈颖,康锐. FMECA 技术及其应用[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2014:31-45.
CHEN Y, KANG R. FMECA methodology and application[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 31-45 (in Chinese).

[2] 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 Z P, FU G C, ZHAO Y H. Improved analysis method of risk priority number[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(11): 1395-1399 (in Chinese).

[3] PILLAY A, WANG J. Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 79(1): 69-85.

[4] 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): 1195-1207.

[5] 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): 102-110.

[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] 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): 4403-4415.

[8] GARCIA P A A, SCHIRRU R. A fuzzy data envelopment analysis approach for FMEA[J]. Progress in Nuclear Energy, 2005, 46(3): 359-373.

[9] 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 G B, HUANG H Z, ZHANG X L. 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 (in Chinese).

[10] 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.

[11] 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): 425-443.

[12] LIU H C, LIU L, LIN Q L. Fuzzy failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning and belief rule-based methodology[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2013, 62(1): 23-36.

[13] CHEN C B, KLEIN C M. A simple approach to ranking a group of aggregated fuzzy utilities[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 1997, 27(1): 26-35.

[14] SONG W, MIN G X, WU Z, et al. Failure modes and effects analysis using integrated weight-based fuzzy TOPSIS[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2013, 26(12): 1172-1186.

[15] 廖炎平,刘莉,龙腾. 基于多属性决策的气动隐身多目标优化[J]. 机械工程学报,2013,48(13):132-140.
LIAO Y P, LIU L, LONG T. Multi-objective aerodynamic and stealthy performance optimization based on multi-attribute decision making[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 48(13): 132-140 (in Chinese).

[16] 王海巧,孙蓓蓓. 基于实例推理的数控刀架快速设计方法[J]. 东南大学学报(自然科学版)2013,43(6):1232-1237.
WANG H Q, SUN B B. Rapid design method of CNC turret based on case-based reasoning[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(6): 1232-1237 (in Chinese).

[17] 张海波,贾亚洲,周广文,等. 数控系统故障模式、影响及危害度分析(FMECA)[J]. 中国机械工程,2004,15(6):

http://bhxb.buaa.edu.cn

491-494.
ZHANG H B, JIA Y Z, ZHOU G W, et al. Failure mode, effects and criticality analysis (FMECA) of CNC system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 15(6): 491-494 (in Chinese).
[18] 战国璋. 基于模糊理论的数控立式车床可靠性预计及故障分析技术[D]. 长春: 吉林大学, 2014: 18-20.
ZHAN G Z. Reliability prediction and fault analysis technology of CNC vertical lathe based on fuzzy theory[D]. Changchun: Jilin University, 2014: 18-20 (in Chinese).

作者简介:

杜晗恒 男, 硕士研究生。主要研究方向: 数控系统可靠性。
Tel.: 010-82316298
E-mail: duhanheng@163.com

彭翀 男, 博士, 助理研究员。主要研究方向: 制造服务与数控装备可靠性。
Tel.: 010-82316298
E-mail: pch@buaa.edu.cn

Failure mode and effects analysis method based on fuzzy TOPSIS

DU Hanheng, PENG Chong*

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the defect of traditional failure mode and effects analysis (FMEA) in evaluating the effect factors of the failure mode and calculating the risk priority number, a FMEA method based on fuzzy technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) is proposed. This method uses fuzzy belief structure to express the evaluation of the effect factors, and adopts defuzzification and the weighted average to establish the clear belief matrix. Moreover, considering the importance of the weights of the effect factors on analysis result, the weights are determined by the combination the subjective weighting method and the objective weighting method, then the weighted normalized matrix can be constructed, and the risk level of each failure mode is ranked in the order of the relative closeness. An example is taken to validate feasibility and effectiveness of the method.

Key words: fuzzy belief structure; effect factor; technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS); failure mode and effects analysis (FMEA); risk level

http://bhxb.buaa.edu.cn

Received: 2015-02-09; **Accepted**: 2015-03-27; **Published online**: 2015-04-28 10:16
URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20150428.1016.001.html
Foundation items: National Science and Technology Major Project (2010ZX04014-017); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (YWF-14-JXXY-004)

* **Corresponding author**. Tel.: 010-82316298 E-mail: pch@buaa.edu.cn