

基于二元语义与灰色关联决策的改进 FMEA 方法

曹嘉容¹, 王 瑛¹, 支 乐²

(1.空军工程大学装备管理与安全工程学院,陕西西安,710051;
2.中国人民解放军驻 113 厂军代室,陕西西安,710077)

摘要 失效模式及效果分析(FMEA)是用来分析系统的潜在风险的常用方法。为解决在专家组对失效模式进行评价时存在的多粒度问题,提出一种改进 FMEA 方法。首先使用二元语义集结对预设样本 E 进行评估,消除多粒度影响,获得基本语言术语数值,再结合灰色关联决策方法计算关联度,进行失效模式排序,最后进行了算例验证。结果表明该方法克服了多粒度因素,达到预期效果,排序清晰。

关键词 FMEA;二元语义;灰色关联决策;多粒度

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.05.021

中图分类号 X39 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)05-0092-04

An Improved FMEA Method Based on 2-Tuple Linguistic and Grey Relational Theory

CAO Jia-rong¹, WANG Ying¹, ZHI Le²

(1. Equipment Management and Safety Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. PLA Military Delegate Office in 113 Factory, Xi'an 710077, China)

Abstract: An improved FMEA method is proposed in order to deal with multi-granularity problem in evaluating failure modes. Firstly, the 2-tuple linguistic representation is applied in evaluating the pre-set sample E to eliminate the effect of multi-granularity and attain the value of the basic linguistic term. Then, the grey relational theory is applied to the calculation of the gray degree to determine the risk priority of the failure modes. The result shows that the risk priority of the failure modes is explicit.

Key words: FMEA; 2-tuple linguistic; grey relational theory; multi-granularity

失效模式及效果分析(FMEA)是可靠性工程领域的基本工具^[1]。传统 FMEA 的可靠性分析是分析产品或系统设计中潜在失效模式的发生频率和严重程度,进而评价各失效模式的风险等级^[2-3]。其存在 2 方面不足:①通过计算故障模式风险优先级指数 RPN 来评估产品或系统的风险等级,只是将发生率(O)、严重程度(S)、难检度(D)的评价值简单相乘得到 RPN,忽略了三者的相对重要性,简单相乘的评价

方式并不客观^[4-5];②在风险评估过程中,不同专家可能会采用不同的评估术语进行评价,也可能使用不同刻度标准的数字、符号和语义描述评价结果。这些多粒度语言评价产生的问题给 FMEA 造成困难。文献[6]使用模糊 FMEA 方法先将 O、S、D 3 因素模糊化,然后根据专家权重对模糊数清晰化得到故障模式排序,此方法使 3 个因素数值化,但是无法解决多粒度问题。文献[7]使用依赖性语言有序

收稿日期:2014-03-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71171199)

作者简介:曹嘉容(1989-),女,江苏南京人,硕士生,主要从事面向供应链的产品质量风险评估研究.E-mail:1797286608@qq.com

引用格式:曹嘉容,王瑛,支乐.基于二元语义与灰色关联决策的改进 FMEA 方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(5):92-95. CAO Jia-rong, WANG Ying, ZHI Le. An improved FMEA method based on 2-tuple linguistic and grey relational theory[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(5): 92-95.

加权集合算子,直接用语言变量表征风险因子进行风险评估,克服了模糊理论评估可能出现的不准确情况,但仍未提出对多粒度条件下的评估方法。使用二元语义评价方法可以避免语言评价信息使用中的扭曲^[8],同时应用二元语义集结算子可以一定程度上解决多粒度评价的问题^[9]。但在 FMEA 中专家组成员对评价术语使用存在不同偏差。

本文首先预设样本集 E ,利用二元语义评价方法使得专家组评价集达到统一,并克服专家在使用评价术语时的偏差,然后对评价术语进行数值化,结合灰色关联决策方法进行 FMEA 排序。

1 二元语义介绍

由西班牙的 Herrera 教授于 2000 年提出的二元语义评价方法能有效避免语言评价信息集结和运算中出现的损失和扭曲,实现计算精度和可靠性的提升^[10]。二元语义采用一个二元组 (s, α) 表示语言评价信息。式中: s 是语言评价信息集中的语言术语; α 称为符号转移值,表示由计算得到的语言信息与初始语言评价集中最接近的语言术语之间的差别, $\alpha \in [-0.5, 0.5)$ 。在不同专家的评价中,由于语言集使用不同而产生多粒度问题,为将多粒度语言信息一致化,同时对灰色关联决策中语言术语数值化处理,本文使用了二元语义方法中的几个算子:

1)语言评价集转换函数:该算子表示见式(1),用于将不同粒度的专家语言术语集统一成所需的语言集 S :

$$F_t^t(s_i^{n(t)}, \alpha^{n(t)}) = \Delta^{-1}(\Delta^{-1}(s_i^{n(t)}, \alpha^{n(t)}(n(t) - 1))/n(t) - 1) \quad (1)$$

式中: $n(t)$ 为专家所处的语言术语集的粒度; $n(t)$ 为基本语言评价集的粒度。

2)T-OWA 算子:该算子用于将多个专家给出的评价矩阵和权重向量转化成群评价矩阵和群权重向量。算子表示为:

$$(\bar{s}, \bar{a}) = \Delta(\sum_{i=1}^l h_i r_i), \bar{s} \in S, \bar{a} \in [-0.5, 0.5) \quad (2)$$

$\mathbf{R} = (r_1, r_2, \dots, r_l)^T$ 中的元素 r_i 是集合 $\{\Delta^{-1}(s_i, \alpha_i) | i = 1, 2, \dots, l\}$ 中第 i 个大的元素, 向量 $\mathbf{H} = (h_1, h_2, \dots, h_l)^T$ 是一个权重向量, $h_i \in [0, 1]$ 且 $\sum_{i=1}^l h_i = 1$ 。

3)二元语义的加权算术平均算子:该算子用于已知二元语义信息集合 $\{(s_1, \alpha_1), (s_2, \alpha_2), \dots, (s_l, \alpha_l)\}$, 相应权重向量为 $\omega = \{(\omega_1, \beta_1), (\omega_2, \beta_2), \dots, (\omega_l, \beta_l)\}$, 对其评价内容进行综合评价。

加权算术平均算子定义为:

$$(\bar{s}, \bar{a}) = \Delta \left(\frac{\sum_{i=1}^l \Delta^{-1}(\omega_i, \beta_i) \Delta^{-1}(s_i, \alpha_i)}{\sum_{i=1}^l \Delta^{-1}(\omega_i, \beta_i)} \right), \bar{s} \in S, \bar{a} \in [-0.5, 0.5) \quad (3)$$

本文应用二元语义将多粒度语言信息一致化,同时得到灰色关联中语言评价的数值。

2 灰色关联决策理论

灰色关联决策理论主要步骤在于建立评价矩阵与参考矩阵并计算其关联度。在 FMEA 小组根据已建立的模糊语言术语集对各种失效模式做出评价并利用二元语义进行统一后,本文应用灰色关联决策的方法以确定各失效模式的风险排序。

设失效模式集为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, x_i 为第 i 种失效模式。由于每种失效模式均有 O, S, D 3 个变量,则每个专家组给出失效模式评价矩阵是一个 $n \times 3$ 矩阵,矩阵中元素 x_{ij} 表示第 i 个失效模式的第 j 个变量的评价,评价的数值通过式(3)得到,如:

$$P^3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 3 & 3 \\ 3 & 4 & 5 \\ 4 & 5 & 5 \end{bmatrix}$$

矩阵中各元素表示第 3 个专家对 O, S, D 的评价。根据灰色关联理论计算失效模式矩阵中各元素与参考基准的关联系数:

$$\xi(X_0, X_i) = \frac{\min_i \min_j |x_0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_0 - x_{ij}|}{|x_0 - x_{ij}| + \zeta \max_i \max_j |x_0 - x_{ij}|} \quad (4)$$

式中 ζ 为分辨系数,取值范围 $(-1, 1)$ 。

根据各元素关联系数结合指标权重可计算失效模式与参考基准的关联度:

$$\gamma(x_0, x_i) = \sum_{j=1}^3 \lambda_j \{ \xi(x_0, x_{ij}) \} \quad (5)$$

式中 λ_j 代表失效模式 3 个变量指标的权重, $\sum_{j=1}^3 \lambda_j = 1$,取值由专家根据实际情况确定。计算得出关联度后即可对失效模式风险排序。

3 二元语义结合灰色关联度 FMEA 方法

设 FMEA 专家组由 p 个不同专家组成, e_q 代表

第 q 个专家。实际应用中,由于不同专家的判别习惯各不同,常采用不同粒度的语言变量,设语言变量集合为 $\{S^1, S^2, \dots, S^p\}$ 。专家给出的语言评价矩阵 P 和权重向量 W 的元素来源于语言变量集合 S 。预设标准语言变量集合为 $S = \{s_0, s_1, s_2, \dots, s_n\}$,同时预设符合此变量集合刻度的一组样本 E 。

本文实现二元语义结合灰色关联度的改进 FMEA 方法步骤见图 1。首先专家对预设样本 E 进行多方面评价,此时评价结果含有多粒度性与专家的主观因素。然而利用二元语义实现语言信息一致化和语言术语数值化:

步骤 1 利用式(1)将语言变量集合 S^p 统一,如统一为 $S = \{\text{极低}(R)、\text{较低}(L)、\text{一般}(M)、\text{较高}(H)、\text{很高}(H_V)\}$ 。将多粒度语言评价矩阵和语言权重向量转换成基本语言术语集。

步骤 2 将统一后各专家的语言评价矩阵 P 和权重向量 W 用式(2)集结出群评价矩阵 A 和权重向量 R 。

步骤 3 利用式(3)计算出综合评价值,对样本组 E 的刻度进行修正。将修正后 E 所对应语言评价的数值应用在灰色关联决策中。同时将专家对失效集 X 的评价使用步骤 1 进行统一。

步骤 4 依据统一后的失效模式评价矩阵建立维度相同的参考矩阵 $\{x_0(t)\}$ 。建立参考矩阵时,选择最差值建立参考矩阵 X_0 ,参考矩阵元素都相等,设为 x_0 。

步骤 5 将修正后的评价数值和统一后的失效模式评价矩阵代入式(4)~(5)求得各失效模式与最差参考项的关联系数 $\gamma(x_0, x_i)$,从而实现失效模式排序。

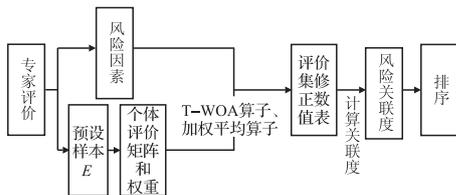


图 1 改进 FMEA 方法流程图
Fig.1 Flow chart of the improved FMEA

4 算例

本文算例分析文献^[11]中某机型襟翼工作系统工作时的关键部件:电磁活门、应急活门、收放动作筒、液压锁和限流活门,这几个部件个体失效可能导致襟翼工作系统失效,产生风险。针对这几个部件,设有 3 名专家分别采用 3 个不同的评价集: $S^1 = \{s_0^1 = L, s_1^1 = M, s_2^1 = H, s_3^1 = H_V\}$; $S^2 = \{s_0^2 = R, s_1^2 =$

$L, s_2^2 = M, s_3^2 = H, s_4^2 = H_V\}$; $S^3 = \{s_0^3 = 1, s_1^3 = 2, s_2^3 = 3, s_3^3 = 4, s_4^3 = 5\}$ 进行评价。设标准集为 $S = \{R, L, M, H, H_V\}$,预设样本 $E = \{R=1, L=2, M=3, H=4, H_V=5\}$ 。3 名专家针对 E 中每一项通过 3 个评价内容给出语言评价矩阵和指标权重的语言评价向量:

$$P^1 = \begin{bmatrix} L & L & L \\ L & M & M \\ M & M & M \\ M & H & H \\ H & H & H_V \end{bmatrix}, P^2 = \begin{bmatrix} R & L & R \\ L & L & M \\ M & L & M \\ M & H & H \\ H & H_V & H_V \end{bmatrix}, P^3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 3 & 3 \\ 3 & 4 & 5 \\ 4 & 5 & 5 \end{bmatrix}$$

$$W^1 = [L \ H \ H_V], W^2 = [H \ M \ H_V], W^3 = [3 \ 5 \ 2]。$$

首先将专家的语言评价信息转化为二元语义形式,然后根据式(1)将其统一到 S 。使用式(2)算子将评价矩阵转化为群评价矩阵和群权重向量:

$$A = \begin{bmatrix} (R, -0.2) & (L, -0.15) & (R, 0.00) \\ (L, 0.05) & (L, -0.30) & (L, -0.15) \\ (L, 0.20) & (M, 0.10) & (M, 0.00) \\ (H, 0.10) & (H, -0.10) & (H, 0.10) \\ (H, 0.30) & (H_V, 0.00) & (H_V, 0.00) \end{bmatrix}$$

$$R = [(H, 0.0) \ (M, 0.2) \ (H, 0.1)]$$

利用式(3)的二元语义加权算术平均算子获得评价集对应数值修正后见表 1。

表 1 语言术语修正数值表

Tab.1 The updated value of the linguistic term

R	L	M	H	H _V
0.9	1.65	2.85	4.1	4.9

获得评价集修正数值表后,由专家小组对各失效模式进行评价,结果见表 2。

表 2 FMEA 评价表

Tab.2 FMEA evaluation

部件名称	失效后果	O	S	D
电磁活门	油液无法放出	M	H	M
应急活门	油液无法放出	H	L	H
收放动作筒	襟翼无法展开	M	M	M
液压锁	襟翼无法锁定	H	H	L
限流活门	油液无法收回	M	M	L

建立比较矩阵:

$$\{x_j(t)\} = \begin{bmatrix} M & M & M \\ H & L & H \\ M & M & M \\ H & H & L \\ M & M & L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.85 & 4.10 & 2.85 \\ 4.10 & 1.65 & 4.10 \\ 2.85 & 2.85 & 2.85 \\ 4.10 & 4.10 & 1.65 \\ 2.85 & 2.85 & 1.65 \end{bmatrix}$$

选择风险最大值作为参考基准建立参考矩阵:

$$\{x_0(t)\} = \begin{bmatrix} H_V & H_V & H_V \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ H_V & H_V & H_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 5 & 5 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 5 & 5 & 5 \end{bmatrix}$$

取分辨系数 $\zeta = 0.5$, 根据式(4)计算失效模式各变量与参考矩阵见的关联系数:

$$\xi(x_0(t), X_j(t)) = \begin{bmatrix} 0.673 & 1.000 & 0.673 \\ 1.000 & 0.512 & 1.000 \\ 0.673 & 0.673 & 0.673 \\ 1.000 & 1.000 & 0.512 \\ 0.673 & 0.673 & 0.512 \end{bmatrix}$$

由专家确定的失效模式变量系数: $\lambda_1 = 0.4, \lambda_2 = 0.4, \lambda_3 = 0.2$ 则根据式(5)计算各失效模式关联度, 并将各失效模式按关联度进行风险排序。本文提出改进 FMEA 方法与传统方法比较见表 3。

表 3 改进 FMEA 方法与传统 RPN 方法排序对比

Tab.3 Comparison between the improved FMEA and conventional FMEA in RPN

失效部件	关联度	排序	O	S	D	RPN	排序
电磁活门	0.697 305	3	5	5	6	150	2
应急活门	0.804 975	2	7	2	8	112	3
收放动作筒	0.675 203	4	6	5	5	150	2
液压锁	0.902 488	1	8	7	3	168	1
限流活门	0.641 053	5	5	5	2	50	4

从表 3 中可以看出, 传统计算 RPN 方法排序结果中管理因素和财务因素 RPN 值均为 150, 排序位置相同, 且均高于生产因素(RPN 为 112); 本文方法排序结果中财务因素失效模式关联度为 0.697 305, 高于管理因素的关联度 0.675 203, 二者风险等级均低于生产因素的失效模式关联度 0.804 975。本文方法较传统方法更客观细致, 更新了部件风险排序, 消除了专家组之间多粒度语言评价中的偏差, 消除了 O、S、D 3 个分量间的相关性。

5 结语

本文将二元语义与灰色关联决策结合, 首先评价预设样本 E 获得多粒度评价的统一刻度, 同时修正样本 E 对应数值, 消除了专家组成员使用刻度的偏差, 获得客观的评价术语数值。算例分析表明基于二元语义与灰色关联决策的 FMEA 方法在风险模式评价排序中克服了多粒度因素和 O、S、D 之间的相关性, 评价结果更客观, 更清晰。

参考文献(References):

[1] Gilchrist W. Modelling failure modes and effects analysis[J]. Int j quality reliab mgmt. 1993, 10(5):16-23.

[2] 李宁, 雷洪利, 韩建定, 等, 飞机供电系统的改进型 PHM 方案[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2011, 12(1): 20-23.
LI Ning, LEI Hongli, HAN Jianding, et al. The improved PHM project research on power system of aircraft[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(1): 20-23. (in Chinese)

[3] Ning-cong Xiao, Hong-Zhong Huang, Yan-feng Li, et al. Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA[J]. Engineering failure analysis, 2011, 18(4): 1162-1170

[4] Hamid Reza Feili, Navid Akar, Hossein Lotfizadeh, et al. Risk analysis of geothermal power plants using failure modes and effects analysis (FMEA) technique[J]. Energy conversion and management, 2013, 72: 69-76

[5] Yuqiao Wang, Guangxu Cheng, Haijun Hu, et al. Development of a risk-based maintenance strategy using FMEA for a continuous catalytic reforming plant[J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2012, 25(6): 958-965.

[6] 马存宝, 李雯, 孙焱, 等. 基于模糊理论的 FMEA 方法研究[J]. 测控技术, 2013, 32(8): 137-144.
MA Cunbao, LI Wen, SUN Yan, et al. Research on the method of FMEA based on fuzzy theory[J]. Measurement & control technology, 2013, 32(8): 137-144 (in Chinese)

[7] 王晓曦, 熊伟, 基于 DLOWG 算子的 FMEA 风险评估方法[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2012, 46(1): 182-188.
WANG Xiaotun, XIONG Wei. Risk evaluation method in FMEA based on dependent linguistic ordered weighted geometric operator[J]. Journal of zhejiang university: engineering science edition, 2012, 46(1): 182-188. (in Chinese)

[8] Hu-Chen Liu, Long Liu, Jing Wu. Material selection using an interval 2-tuple linguistic VIKOR method considering subjective and objective weights[J]. Materials and design, 2013, 52: 158-167.

[9] Shih-Yuan Wang, Applying 2-tuple multigranularity linguistic variables to determine the supply performance in dynamic environment based on product-oriented strategy[J]. IEEE transactions on fuzzy systems, 2008, 16(1): 29-39.

[10] Herrera F, Martinez L. A model based on linguistic 2-tuple for dealing with multi-granularity hierarchical linguistic contexts in multi-expert decision-making[J]. IEEE transactions on systems, man and cybernetics, part b: cybernetics, 2001, 31(2): 322-40.

[11] 孙海龙, 郭书祥, 贾永安. 某型飞机襟翼系统可靠性分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2006, 7(4): 8-10.
SUN Hailong, GUO Shuxiang, JIA Yongan. Reliability analysis of the flap system of a certain type of aircraft[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2006, 7(4): 8-10. (in Chinese)

(编辑: 徐敏)