

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.12.018

基于广义证据理论的 FMEA 评分冲突融合模型^①

周雪莲, 刘 枫, 唐永川

西南大学 计算机与信息科学学院, 重庆 400715

摘要: 针对失效模式与后果分析中不同专家之间的评分差异, 在分析其差异来源后, 基于广义证据理论(GET)对专家之间的评分冲突进行合理解释和量化表示; 随后, 对有效量化冲突后的专家评分, 并利用 GET 中的广义组合规则(GCR)对其进行融合; 最终, 根据 FMEA 评分的融合结果, 计算出 FMEA 的风险顺序数. 利用本文方法对航空发动机涡轮转子叶片进行 FMEA 分析, 实验数据表明本文方法比基于经典证据理论的 FMEA 冲突融合方法更能精确地表达专家之间的评分冲突.

关键词: 失效模式与后果分析(FMEA); 广义证据理论; 广义组合规则; 风险顺序数(RPN); 冲突融合

中图分类号: TP182 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9868(2016)12-0108-07

风险分析存在于社会生产生活的各个领域^[1-8], 失效模式与后果分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)^[2-7]是一种重要的定义、辨识、预防已知或未知潜在风险的有效工具, 自 20 世纪 60 年代 FMEA 建立以来, 已被广泛用于许多领域的系统、设计、服务、过程等方面的风险分析中^[2-7]. 然而, 传统的 FMEA 模型自身的一些局限性也被诟病^[9], 针对它的改进方法也在一些文献中得到报道^[10-14]. 在诸多关于传统 FMEA 模型不足的问题中, 针对某种失效风险的可能发生频度 O (Occurrence)、严重程度 S (Severity)和可被探测性 D (Detection)这 3 种风险因子不容易获得精确评价的问题, 可借助 Dempster-Shafer 证据理论^[15-17]进行不精确评价信息的融合.

近年来, 基于 Dempster-Shafer 证据理论还提出了一些新的理论^[18-22], 与经典证据理论相比, 在处理不确定信息方面呈现出一些新的优点. 其中, 广义证据理论(GET)是经典证据理论的直接推广, 借助 GET 理论中的广义组合规则(GCR)能有效地解决经典证据理论中冲突信息不能被有效融合的问题. 因此, 本文利用 GCR 提出一种新的 FMEA 评分冲突融合模型.

本文首先对风险顺序数(RPN)、广义证据理论中广义组合规则等理论背景知识进行概要介绍; 随后, 结合 GET 中的 GCR 模型, 提出了一种新的 FMEA 评分冲突融合模型, 并利用新提出的 CFRPN(Conflict free RPN)方法以航空发动机涡轮转子叶片为例进行 FMEA 实例分析; 实例分析表明, 本文提出的改进的 FMEA 模型具有更精确的冲突信息量化表示与融合能力.

1 相关理论简介

1.1 风险顺序数

FMEA 文件最重要的角色之一是通过 RPN 值提供所有潜在失效模式的优先级. 这样有限的资源可

① 收稿日期: 2016-02-15
基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAK41B00); 国家“863”计划课题(2012AA041101); 重庆市集成示范计划项目(CSTC2013JCSF00004).
作者简介: 周雪莲(1966-), 女, 重庆人, 副教授, 硕士, 主要从事工业过程测量和控制技术及其标准化研究.
通信作者: 刘 枫, 教授, 硕士研究生导师.

以用于处理高优先级的失效模式,以减少乃至消除风险,实现组织更高的收益.在经典 FMEA 中,RPN 值是 3 种风险因子(O,S,D)的乘积,如公式(1)所述.对每一种风险因子,其风险等级被定义为从 1 到 10 的一个整数,严重程度风险因子 S 的评价准则如表 1 所述.

$$RPN=O\times S\times D$$

(1)

表 1 FMEA 中严重度(S)参考评价准则

等 级	后 果	评 价 标 准
10	无警告危害	无警告/能对操作人员造成伤害/违反了政府规定
9	有警告危害	有警告/能对操作人员造成伤害/违反了政府规定/标准
8	非常高	产品不可用、失去主要功能/系统不工作
7	高	造成产品功能严重破坏/系统可能不工作
6	中等	产品功能降级/舒适性或便利性功能可能不可用
5	低	对产品功能产生中等影响/产品需要修复
4	很低	对产品功能产生小的影响/产品不需要修复
3	轻微的	对产品或系统表现产生轻微的影响
2	极其轻微	对产品或功能产生极其轻微的影响
1	无	不会产生影响

1.2 广义组合规则

广义证据理论体系中,广义基本概率指派(GBPA)对应经典证据理论的基本概率指派(BPA),用于表达、建模不确定数据信息,广义组合规则(GCR)则用于融合不同的证据数据信息.

假设 U 是辨识框架,对于任意命题 $A, \forall A\subset U$,定义 mass 函数为映射 $m: 2^U\rightarrow[0, 1]$,该映射满足

$$\sum_{A\in 2^U}m(A)=1$$

(2)

式中, m 是辨识框架 U 中的 GBPA. GET 理论中, $m(\phi)=0$ 不再是必须的 GBPA 约束条件,还能用于建模开放世界里其他未知的不确定因素.

对于 2 组 GBPA m_1 和 m_2 , GCR 定义如下:

$$m(A)=\frac{(1-m(\phi))\sum_{B\cap C=A}m_1(B)\cdot m_2(C)}{1-K}$$

(3)

$$K=\sum_{B\cap C=\phi}m_1(B)\cdot m_2(C)$$

(4)

$$m(\phi)=m_1(\phi)\cdot m_2(\phi)$$

(5)

$$m(\phi)=1, \text{当且仅当 } K=1$$

(6)

在公式(5)中, $m(\phi)=m_1(\phi)\cdot m_2(\phi)$ 表示 2 个空集的交集仍然是空集,其物理意义应该解释为未知情况仍然充满不确定性.

2 基于 GCR 的 FMEA 评分冲突融合模型

本节首先分析了 FMEA 中评分冲突产生的种种因素,再利用广义证据理论中的广义组合规则将该评分冲突建模、量化,最后得到改进后的无冲突风险顺序数 CFRPN(Conflict free RPN)替代传统 FMEA 模型中的 RPN 值.

2.1 FMEA 评分冲突成因分析

为了编制 FMEA 文件而成立的 FMEA 小组中,包含了若干名专家成员,针对每一种可能的失效模式,不同组员评分可能不同,其原因主要包含如下几个方面:

1) 对同一问题,小组成员视角不同,因为小组成员来自公司或组织的不同部门、扮演组织中不同的角色并承担不同类型的责任.例如,在一个标准的 FMEA 小组中,包括了来自研发部门、生产部门、试制试验部门、市场部门、售后服务部门等组织内部机构的专业人员,不同人员在进行评分评价时视角不同、意

见不同是正常且符合规律的;

2) 不同专家的学术背景不同. 上述不同的 FMEA 小组成员, 其专业知识、学历背景不同, 专业知识范畴广泛. 因此, 需要成立学科交叉的 FMEA 小组以达到控制质量、优化产品、提高效益、确保安全、控制好风险等诸多优势目标;

3) 不同专家经验迥异. 不同的工作经验乃至生活经验对不同专家的主观性评分评价都会产生不同的影响, 会带来不同的主观评价结果.

综上可知, 评分冲突属于一种知识冲突或者称作经验知识冲突. 这种开放世界里的不确定性知识冲突, 可以通过 GET 理论体系的空集进行建模量化表达, 然后采用 GCR 模型对不同专家冲突知识进行合理融合.

2.2 FMEA 评分冲突量化

在实际应用中, 作为一种模糊的主观评价, FMEA 小组成员可能通过百分比的方式给某种失效模式评价多个风险等级^[2-3], 同时, 对某种失效模式的不同风险等级累加百分比应不超过 100%. 在评分评价过程中, FMEA 小组内不同专家之间的风险等级评分可能千差万别, 甚至互相冲突, 所以需要有效量化、融合这些评分冲突. 这种因为工作经验、知识背景、岗位角色、生活经验产生的评分冲突表明 GET 理论所描述的开放世界里辨识框架不完整. 即, FMEA 小组内不同专家之间的知识框架(对知识的辨识框架)是不完整的, 不能通过现有的类似表 1 中的风险等级进行有效地表达. 鉴于此, 本文通过 GET 理论的空集有效地表达这种辨识框架的不完整性, 即通过对 $m(\phi)$ 赋值表达辨识框架之外的专家知识, 进而融合到最终的风险等级模型中.

定义 1 针对任意一种失效模式, 2 名 FMEA 专家之间的评分冲突通过 $m(\phi)$ 表述为: 2 个专家评分等级最大值之差与最小值之差的平均值的 $\frac{1}{10}$. 如公式(7)所述.

$$m(\phi) = \frac{\frac{1}{2}(|m_{\max}^{E_1} - m_{\max}^{E_2}| + |m_{\min}^{E_1} - m_{\min}^{E_2}|)}{10} \quad (7)$$

公式(7)代替 GET 理论中的公式(5)和公式(6), 参数“10”是借用表 1 中所描述的 10 个风险等级数, 这样 $m(\phi)$ 的取值始终不会超过 1. 同时, 公式(7)中, $m_{\max}^{E_1}$ 和 $m_{\max}^{E_2}$ 分别表示 2 个专家 E_1 和 E_2 的评分的最大值, 同理, $m_{\min}^{E_1}$ 和 $m_{\min}^{E_2}$ 则分别表示评分的最小值; 当最大值与最小值相等时, 则意味着专家给某一个风险等级赋值为 100% 的置信度.

此外, 公式(7)中, 若 FMEA 专家直接给空集以非 0 的赋值, 意味着该专家已经认识到自己经验知识的不完整性, 因而将这种不完整性也以 GBPA 的方式用空集的 mass 函数量化、表达. 这样, 公式(7)又将退化为其原始的公式(5)和公式(6)的赋值形式, 并得以融合.

通过定义 1 及其公式(7), 一些数值特性和物理意义可以总结如下:

- 1) $m(\phi)$ 的最小值为 0. 此时, 2 名 FMEA 专家对某一失效模式的某一种风险因子赋予相同的风险等级;
- 2) $m(\phi)$ 的最大值为 0.9. 此时, 2 名 FMEA 专家之间的评分冲突最大; 其中一名专家 100% 肯定其风险等级是 10, 而另外一名专家的评分等级则 100% 确定是 1;
- 3) $m(\phi)$ 的取值区间为 $[0, 0.9]$. 依据前 2 条特性得出;
- 4) 当且仅当 $m(\phi) = 0$ 时, GCR 规则退化为经典的 Dempster-Shafer 证据理论中的 Dempster 组合规则. 该条性质可根据广义证据理论本身的优点直接得到.

2.3 FMEA 无冲突风险顺序数(CFRPN)

假设有 L 名($E_1, E_2, \dots, E_{L-1}, E_L$)专家在一个 FMEA 小组中对 N 种潜在的失效模式及其可能失效后果($F_1, F_2, \dots, F_{N-1}, F_N$)进行分析. 则对于第 i 种风险因子, 其第 n 种失效模式的不完整辨识框架 θ_i^n 可表述为:

$$\theta_i^n = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10); i = O, S, D; n = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

定义 2 某失效模式的无冲突风险顺序数 (CFRPN) 通过如下 4 个步骤得到. 如图 1 所述.

步骤 1 通过 GBPA 构造各失效模式的 FMEA 专家的评分信度结构.

类似经典证据理论的 BPA^[15-17], GBPA 是通过 mass 函数 $m(A)$ 描述对命题的置信度水平, 此时即有映射: $m(A): 2^{\theta_i^n} \rightarrow [0, 1]$. 区别于经典证据理论的方法, 此处空集的 GBPA 赋值不是 0, 而是通过定义 1 的公式(7)进行赋值.

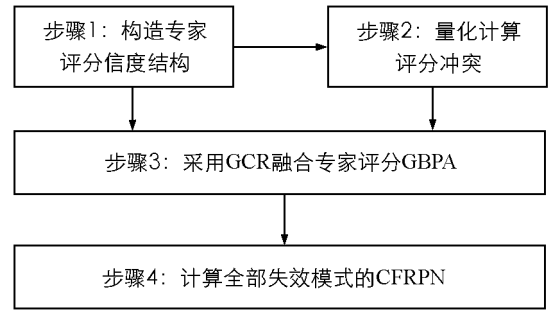


图 1 CFRPN 计算步骤

$$\sum m(A) = 1 \quad A \in 2^{\theta_i^n} \quad (9)$$

公式(9)中 $\theta_i^n = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10)$; $i = O, S, D$; $n = 1, 2, \dots, N$; $m(A)$ 表示各专家支持命题 A 的置信度大小, 并且命题 A 中可能存在对一个失效模式的多个等级, 按百分比概率赋值.

步骤 2 量化计算评分冲突.

如果步骤 1 中所得空集的 GBPA 值为 0, 即专家并未意识到自身辨识框架的不完整性, 则通过公式(7)量化评分冲突.

步骤 3 采用 GCR 融合专家评分 GBPA.

通过 GCR 公式(3)~(6), 来自不同专家的经过步骤 2 处理后的无冲突的风险评分得到有效地融合. 此外, 因为 GCR 组合规则是经典证据理论中 Dempster 组合规则的直接推广, 满足交换律和结合律, 因此可以任意次序融合. 对于第 i 种风险因子(O, S, D)的第 n 种失效模式, 针对命题 $A \subset \theta_i^n$, 全部 L 位专家的评分组合后得到公式(10).

$$M_i^n(A) = (M_{i1}^n \oplus M_{i2}^n \oplus \dots \oplus M_{iL}^n)(A) \quad (10)$$

步骤 4 计算全部失效模式的 CFRPN 值.

对于第 n 种失效模式, 其 CFRPN 值由公式(11)可得. 同时, 公式(7)所表示的冲突信息的 mass 函数其风险等级通过取中间数的方式获得, 本文将其赋值为等级 6. 在实际应用中, 例如针对每一个汽车零部件系统分别编制一份 FMEA 文件的过程中, 供应商对不同零部件的产品质量进行管控, 可能对于新开发零部件系统采用悲观策略, 将其赋值为等级 10; 还可能针对非常成熟的零部件产品, 采取乐观策略, 将其赋值为 1; 这些主观评价信息可能完全取决于产品的历史经验数据及各领域专家成员的经验策略.

$$CFRPN_n = [O \cdot M_O^n(A) + 6M_O^n(\phi)] \times [S \cdot M_S^n(A) + 6M_S^n(\phi)] \times [D \cdot M_D^n(A) + 6M_D^n(\phi)] \quad (11)$$

3 实例分析: 航空发动机涡轮转子叶片 FMEA

本节将本文所提方法模型实际应用于航空发动机涡轮转子的 FMEA 分析^[3, 24]中(文献[24]共计分析了 17 种涡轮转子叶片的失效模式), 并通过采用本文方法所得到的 CFRPN 值与文献[3, 4]中的计算结果比较以验证所提出方法的有效性和优势.

3.1 新方法实验步骤

参照文献[3, 4, 24]中的实验数据来执行本文所提出的改进的 FMEA 模型方法, 采用文献[3]中数据构造 GBPA 的信度结构, 以便于对实验结果进行比较研究. 为了同时体现出所提出方法的 CFRPN 计算过程, 以文献[3]中第 12 种失效模式为例展示所提出方法的试验过程.

步骤 1 通过 GBPA 构造第 12 种失效模式的各 FMEA 专家的评分信度结构.

对于文献[3]中第 12 种失效模式, 各风险因子的 3 位专家 GBPA 赋值如下:

$$O: m_{O1}^{12}(1) = m_{O2}^{12}(1) = m_{O3}^{12}(1) = 1.0;$$

$$S: m_{S1}^{12}(10) = m_{S2}^{12}(10) = m_{S3}^{12}(10) = 1.0;$$

$$D: m_{D1}^{12}(6) = 0.6, m_{D1}^{12}(5) = 0.4; m_{D2}^{12}(5) = 0.8, m_{D2}^{12}(4) = 0.2; m_{D3}^{12}(6) = 0.7, m_{D3}^{12}(5) = 0.3.$$

步骤 2 量化计算第 12 种失效模式的评分冲突.

第 12 种失效模式对于风险因子 D 存在评分冲突, 对于风险因子 O 和 S 不存在专家评分冲突. 对于风险因子 D , 专家 1 与专家 2 的评分冲突可通过公式(7)进行计算.

$$m_{D(1,2)}^{12}(\phi) = \frac{\frac{1}{2}(|m_{\max}^{E_1} - m_{\max}^{E_2}| + |m_{\min}^{E_1} - m_{\min}^{E_2}|)}{10} = \frac{1}{2}[(6-5) + (5-4)] = 0.1$$

(12)

步骤 3 采用 GCR 融合 FMEA 小组专家对第 12 种失效模式的评分 GBPA.

$$K_{D(1,2)}^{12} = m_{D_1}^{12}(6) \cdot [m_{D_2}^{12}(5) + m_{D_2}^{12}(4)] + m_{D_1}^{12}(5) \cdot m_{D_2}^{12}(4) = 0.68$$

(13)

$$m_{D(1,2)}^{12}(5) = \frac{[1 - m_{D(1,2)}^{12}(\phi)] \cdot [m_{D_1}^{12}(5) \cdot m_{D_2}^{12}(5)]}{1 - K_{D(1,2)}^{12}} = \frac{(1 - 0.1) \cdot 0.4 \cdot 0.8}{1 - 0.68} = 0.9$$

(14)

重复步骤 2 和步骤 3, 得到各风险等级的 GBPA 值, 如下所示:

$$M_D^{12}(\phi) = m_{D((1,2),3)}^{12}(\phi) = 0.05$$

(15)

$$K_D^{12} = K_{D((1,2),3)}^{12} = 0.73$$

(16)

$$M_D^{12}(5) = m_{D((1,2),3)}^{12}(5) = 0.95$$

(17)

对于第 12 种失效模式的其他 2 种风险因子(O 和 S), 其 GBPA 值如下所示:

$$M_O^{12}(\phi) = 0, K_O^{12} = 0, M_O^{12}(1) = 1$$

(18)

$$M_S^{12}(\phi) = 0, K_S^{12} = 0, M_S^{12}(10) = 1$$

(19)

步骤 4 计算第 12 种失效模式的 CFRPN 值.

根据公式(11)所述, 第 12 种失效模式的 CFRPN 值计算如下所示:

$$CFRPN_{12} = [O \cdot M_O^n(A) + 6M_O^n(\phi)] \times [S \cdot M_S^n(A) + 6M_S^n(\phi)] \times [D \cdot M_D^n(A) + 6M_D^n(\phi)] =$$

$$1 \cdot 1 \times 1 \cdot 10 \times (5 \cdot 0.95 + 6 \cdot 0.05) = 50.5$$

(20)

重复上述步骤 1~4, 计算得到全部 17 种失效模式的 CFRPN 值, 如表 2 所述. 表 2 中, 还列出了文献[3, 4]中基于经典证据理论改进方法计算所得的 MVRPN 值, 用以进行分析、比较.

表 2 CFRPN 值与文献[3,4]中 MVRPN 值对比分析

组件失效模式	CFRPN	MVRPN ^[3]	MVRPN ^[4]	组件失效模式	CFRPN	MVRPN ^[3]	MVRPN ^[4]
FM1	42.56	42.56	42.56	FM10	60.00	60.00	60.00
FM2	64	64.00	64.05	FM11	50	50.00	50.00
FM3	30	30.00	30.00	FM12	50.5	50.00	50.00
FM4	18	18.00	17.97	FM13	50	60.00 *	50.00
FM5	3.72	4.17	3.14	FM14	60	60.00	60.04
FM6	60	60.00	60.00	FM15	42	42.00	42.09
FM7	21	21.00	21.00	FM16	23.88	23.88	23.86
FM8	15.15	15.00	15.00	FM17	30.05	50.90 * *	30.05
FM9	78.92	78.92	79.57				

注: * 文献[3]中该值计算有误, 正确计算结果应该为 50; * * 文献[3]中该值计算有误, 正确计算结果应该为 30.

3.2 实验结果分析

分析表 2 中本文所提出方法的计算结果, 并与文献[3,4]中的 RPN 值进行对比分析. 因为文献[4]是对文献[3]所述计算方法的改进, 并且其对部分失效模式得到等级“0”的结果的合理性有待商榷; 而且, 根据文献[4]中的说法, 其 RPN 值的最终结果与文献[3]中是协调一致的. 基于此, 本文后续实验分析的数值比较部分仅与文献[3]进行对比分析.

表 2 中, FM1, FM9 的 CFRPN 值与 MVRPN 一致, 这是因为该专家评分条件下, GCR 退化为经典的 Dempster 组合规则. 对于 FM2, FM4, FM13, FM14, FM15, FM16 和 FM17, CFRPN 值与 MVRPN 计算结果协调一致, 这也印证了本文所提出方法对文献[3]所采用的经典证据理论方法的良好兼容性. 对于 FM3, FM6, FM7, FM10 和 FM11, 专家之间不存在评分冲突, 实验数据结果完全一致. 对于 FM5, 本文

提出的方法计算所得的 CFRPN 值比文献[3]中的 MVRPN 值稍小一些,这是因为 3 位专家针对 FM5 的评分冲突较大,本文计算结果较之于文献方法更敏感地体现出了专家之间的评分冲突;而如何控制 RPN 值以降低风险是另外一个重要的 FMEA 分析问题,本文不作深入讨论.在 FM8 和 FM12 中,CFRPN 值与 MVRPN 值的差异表明,本文方法对专家的评分冲突信息更加敏感,因而更加精确;此外,还体现了本文的方法能较好地解决传统 FMEA 模型中 RPN 值存在大量重复影响最终排序这一典型的问题.

综上所述,本文所提出的方法模型能兼容文献[3]中的模型,这主要得益于 GET 理论兼容经典 Dempster-Shafer 证据理论的优点,保证了本文所提出方法的有效性.此外,本文方法对专家的冲突评分信息更加敏感,这一优点能够保证本文的方法在处理 FMEA 小组专家间冲突信息时具有良好的应用优势.

4 结 论

本文基于广义证据理论提出了一种新的改进的 FMEA 模型,使其能够融合 FMEA 小组专家之间的冲突评分信息.借助广义证据理论的空集建模思想,本文提出的 FMEA 模型将不同专家之间的评分冲突追根溯源、合理量化后成功建模.与文献中实验数据对比分析表明,所提出的方法不仅兼容经典证据理论的 FMEA 改进模型,而且能获得更精确的不确定信息建模、量化表示和冲突信息融合能力.所提出方法的上述优势在针对航空发动机涡轮转子叶片的 FMEA 实例分析中得到了验证.

参考文献:

- [1] 赵金娥,王贵红,龙 瑶.理赔次数为复合 Poisson-Geometric 过程的风险模型[J].西南大学学报(自然科学版),2013,35(3):78—83.
- [2] 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.
- [3] YANG J, HUANG H Z, HE L P, 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.
- [4] SU X Y, DENG Y, MAHADEVAN S, et al. An Improved Method for Risk Evaluation in Failure Modes and Effects Analysis of Aircraft Engine Rotor Blades[J]. Engineering Failure Analysis, 2012, 26(12): 164—174.
- [5] 杨晓莉,曹艳佩,马 昕,等.应用失效模式和影响分析改善住院病人化疗用药安全的研究[J].护理研究,2013,27(1):70—72.
- [6] 胡 定,于 潇,郑永泉,等.基于 FMEA 法的预评估失效模式分析及改进方法[J].气象研究与应用,2015,36(2):100—102.
- [7] 金初云,蓝 蓓. FMEA 在直流电钻开发中的应用分析[J].控制工程,2013,20(3):577—579,584.
- [8] 郭淑妹,郭 杰,张 宁.带干扰和支付红利的经典风险模型的最优投资[J].西南师范大学学报(自然科学版),2013,38(1):22—25.
- [9] LIU H C, LIU L, LIU N. Risk Evaluation Approaches in Failure Mode and Effects Analysis: a Literature Review[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(2): 828—838.
- [10] DU Y X, MO H M, DENG X Y, et al. A New Method in Failure Mode and Effects Analysis Based on Evidential Reasoning[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2014, 5(1): 1—10.
- [11] BOZDAG E, ASAN U, SOYER A, et al. Risk Prioritization in Failure Mode and Effects Analysis Using Interval Type-2 Fuzzy Sets[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42(8): 4000—4015.
- [12] PILLAY A, WANG J. Modified Failure Mode and Effects Analysis Using Approximate Reasoning[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2003, 79(1): 69—85.
- [13] DU Y, LU X, SU X, et al. New Failure Mode and Effects Analysis: An Evidential Downscaling Method[J]. Quality & Reliability Engineering, 2014, 32(2): 737—746.
- [14] LIU H C, YOU J X, FAN X J, et al. Failure Mode and Effects Analysis Using D Numbers and Grey Relational Projection Method[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(10): 4670—4679.

- [15] DEMPSTER A P. Upper and Lower Probabilities Induced by a Multi-Valued Mapping [J]. Annals of Mathematical Statistics, 1967, 38(2): 325—339.
- [16] SHAFER G. A Mathematical Theory of Evidence [M]. Princeton New Jersey USA: Princeton University Press, 1976.
- [17] SHAFER G. Perspectives on the Theory and Practice of Belief Functions [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 1990, 4(5/6): 323—362.
- [18] Deng Y. Generalized Evidence Theory [J]. Applied Intelligence, 2015, 43(3): 530—543.
- [19] 邓 勇, 蒋 雯, 韩德强. 广义证据理论的基本框架 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(12): 119—124.
- [20] 邓 勇, 韩德强. 广义证据理论中的基本概率指派生成方法 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(2): 34—38.
- [21] Deng Y. D Numbers: Theory and Applications. [J]. Journal of Information & Computational Science, 2012, 9(9): 2421—2428.
- [22] DENG X, HU Y, DENG Y, et al. Supplier Selection Using AHP Methodology Extended by D Numbers [J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(1): 156—167.
- [23] SANKAR N R, PRABHU B S. Modified Approach for Prioritization of Failures in a System Failure Mode and Effects Analysis [J]. International Journal of Quality & Reliability Management, 1984, 18(3): 324—336.
- [24] 钟培道. 航空发动机涡轮转子叶片的失效与教训 [J]. 材料工程, 2003(z1): 30—33.

A Rating Conflict Fusion Model of FMEA Based on Generalized Evidence Theory

ZHOU Xue-lian, LIU Feng, TANG Yong-chuan

School of Computer and Information Science, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In order to handle the rating conflicts among each expert in failure mode and effects analysis (FMEA), after analyzing the source of conflict, the rating conflict in FMEA is interpreted and expressed properly based on generalized evidence theory(GET). Then, the ratings along with the quantified conflict of different experts are combined by generalized combination rule(GCR) in GET. Finally, the risk priority number(RPN) of FMEA is calculated based on combined ratings. The proposed method is used in a real case study to the rotor blades of an aircraft turbine, and compared with the method of conventional Dempster-Shafer evidence theory, it can express the rating conflict among experts more accurately.

Key words: failure mode and effects analysis (FMEA); generalized evidence theory; generalized combination rule; risk priority number(RPN); conflict combination

责任编辑 崔玉洁

