

doi: 10.7690/bgzdh.2020.02.013

基于模糊证据认知图的装备维修风险评估方法

肖 雄, 董 鹏

(海军工程大学管理工程与装备经济系, 武汉 430033)

摘要: 针对在实际风险评估中, 风险矩阵、贝叶斯网络和概率风险分析等方法存在应用性不足的问题, 提出一种综合模糊认知图和证据理论优点的模糊证据认知图方法。给出复杂装备维修风险评估框架, 阐述基于模糊证据认知图的维修风险评估原理, 并以某柴油机维修项目为例, 从风险因素、风险后果层面进行风险分析, 得出具体控制措施。结果表明, 该方法是可行、有效的。

关键词: 维修; 风险评估; 模糊证据认知图

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Equipment Maintenance Risk Assessment Method Based on Fuzzy Evidence Cognitive Map

Xiao Xiong, Dong Peng

(Department of Management Engineering & Equipment Economics, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient application of risk matrix, Bayesian network, and probabilistic risk analysis in actual risk assessment, proposes a comprehensive fuzzy cognitive map method and fuzzy evidence cognitive map method of evidence theory advantages. The risk assessment framework of complex equipment maintenance is given, and the principle of maintenance risk assessment based on fuzzy evidence cognition map is expounded. Taking a diesel engine maintenance project as an example, the risk analysis and risk consequence level are used to analyze the risk and obtain specific control measures. The results show that the method is feasible and effective.

Keywords: maintenance; risk assessment; fuzzy evidential cognitive maps

0 引言

国外关于维修风险的研究主要集中在航空和海上石油开采领域, 文献[1-2]在一份台湾航空的研究报告中重点分析了航空维修事故中的人因事故的类型, 建立了维修风险评估的风险矩阵方法, 并有针对性地制定风险防范措施; 文献[3]提出利用风险评估和关键链的方法进行建模, 对一个整体煤气化联合循环发电系统的工程周期进行了评估优化; 文献[4]建立了核电站维修的概率风险分析方法(PSA), 并开发了相应软件; 文献[5]提出一种基于传统的故障树与事件树的 Bayes 网络维修风险评估方法, 并对海上石油开采的维修工程进行了风险推理。维修风险理论目前主要集中在维修差错管理领域, 即分析维修中的人因事故, 但针对笔者研究的复杂装备维修问题, 风险矩阵法得出的结果较为粗略, 而贝叶斯网络和特定风险分析法(PRA)等方法则需要大量数据进行支撑, 不符合实际情况。

笔者提出一种综合模糊认知图和证据理论优点

的模糊证据认知图方法, 将其应用于复杂装备风险评估, 既可利用模糊认知图解决风险因素的关联性分析问题, 提高风险评估准确性, 又可利用证据推理提高风险评估的稳定性。

1 复杂装备维修风险评估框架

装备维修风险是指在装备修理过程中可能出现各种危及装备设施、人员生命和环境污染等方面的恶性事件, 以及可能出现的进度超期或费用超支现象。为理清维修风险的内在关系, 笔者将维修风险分成风险因素、风险后果以及风险损失 3 个层面。风险因素是风险后果产生的直接原因; 风险后果是风险因素可能的外在表现; 风险损失是风险后果对质量、进度以及费用等问题的影响程度。

维修风险评估是风险识别的总结和归纳, 也是进行维修风险控制的主要依据, 所以维修风险评估是维修风险管理中的核心和纽带。维修风险主要包含风险因素、风险后果和风险损失 3 个部分, 它们之间的逻辑关系如图 1 所示。

收稿日期: 2019-09-03; 修回日期: 2019-11-08

作者简介: 肖 雄(1995—), 男, 湖北人, 硕士, 从事装备管理研究。E-mail: 15071078081@163.com。

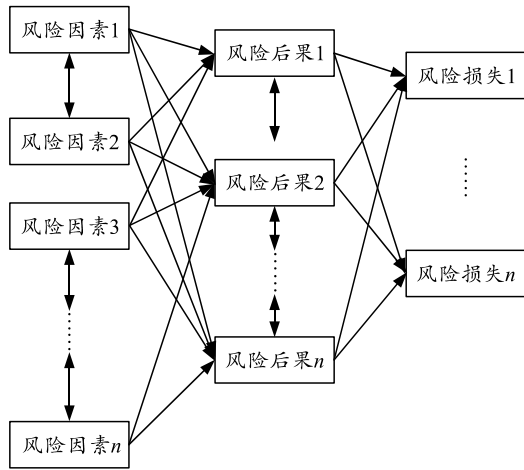


图 1 风险评估逻辑

在研究维修风险评估时,采用专家评估的方式。专家评估主要适用于结构相对模糊、历史经验较少的评价问题。在实际情况中,涉及复杂装备维修的领域中,由于历史数据的缺乏,往往只能采用专家评估法。通过对专家评价结果的收集和处理,明确风险因素的种类以及相关性,了解不同的风险后果容易造成哪些风险损失,最后将风险损失的大小以及发生的概率计算出来。

2 基于模糊证据认知图的维修风险评估

2.1 模糊证据认知图的提出

模糊认知图将模糊概念引入系统对象间因果关系的定性分析中,具有很强的模糊信息表达和推理能力。由于在构造方法时,专家一般是基于自己的主观经验,具有较大的不确定性,同时由于认识程度的局限性,专家的经验往往呈现出较大的分歧。所以模糊认知图在表达冲突信息方面的能力不足,以及在不确定信息融合方面的劣势是需要改进的重要方面。

模糊证据认知图是在结合模糊认知图和证据理论的基础上建立的评估方法,是将证据理论中的辨识框架看作是模糊集合,利用维修风险评估中的不确定结构来表示辨识框架的不确定性,得到辨识框架集合的隶属函数,在此基础上构造证据理论的 mass 函数,完成证据理论向模糊集的推广。在实际评估过程中,专家的意见并非绝对可靠,笔者利用模糊的手段来表现专家意见的相互支持程度,并利用相对可信度得到各个专家所提供证据的折扣系数,利用折扣系数法的证据组合规则有效地解决了证据冲突时的信息融合问题。模糊证据认知图一方面拥有模糊认知图在信息表达和推理能力方面的优

势,保留了模糊认知图的大信息容量;另一方面也具备了证据理论在处理不确定信息和模糊概念的能力,尤其是融合多源不确定信息的能力。相比于原来的模糊认知图,模糊证据认知图具有更加精确的知识表达和系统建模能力^[6]。

2.2 基于模糊证据认知图的维修风险评估原理

在构建维修风险评估系统模糊证据认知图的过程中,必须利用维修风险评估相关的知识和经验。由于相关领域专家了解系统建模的关键因素,并能够用概念节点来描述这些关键因素,因此,可由专家来确定描述系统的最佳概念。这些概念节点可以是维修风险评估的特征、状态、变量、输入或者输出等。对于构建完成的概念节点,先根据专家的意见在[0,1]之间定义节点的初始水平,接着利用模糊集概念,构造相应的 mass 函数集。在得到风险因素的概率函数后,通过证据理论进行风险因素的融合,得到最终的专家评价意见。结构简图如图 2 所示。

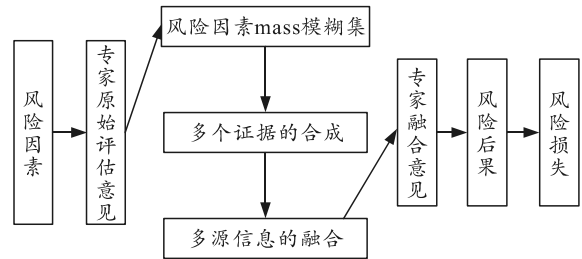


图 2 模糊认知

2.3 基于模糊证据认知图的维修风险评估步骤

通过对方法的原理和结构的分析,可以明确首先要获取专家意见并进行模糊处理,然后对几个模糊集的评价意见进行合成,最后对多源信息进行融合,并得到评估结果。具体步骤如下:

1) 建立模糊集合及 mass 函数。

证据理论基于经典集合,而经典集合只表现具有明确外延的概念。要想将模糊概念定量表现,经典集合就必须进行一定的推广。为了定量地刻画模糊的概念与现象,L·Zadeh 教授于 1965 年提出了模糊集合这一重要概念:

定义 1 论域 U 的一个模糊子集 A 是指 U 到 $[0,1]$ 的一个映射:

$$m_A(X):U@[0,1]。 \tag{1}$$

映射 m_A 称为 A 的隶属函数,表示元素 x 对 A 的隶属度。

关于证据理论的推广,可采用 Guan 和 Bell 提出的广义证据理论。Guan 和 Bell 的方法是把有限

的幂集合 2^W 推广为一个布尔代数 $\langle X, \cup, \cap, * \rangle$ ，研究认为推理中多数空间均可视为布尔代数。笔者从实际应用的角度出发，将维修中的评估结果视为模糊集，这与实际中证据常以模糊语言或模糊值的形式出现相吻合。接着，利用模糊函数来构造 mass 函数，然后运用合成公式进行融合，以实现证据理论向模糊集的推广，称之为模糊证据理论。

对论语 U 的 n 个模糊集合，有 m 个评委，分别为： m_1, m_2, \dots, m_m ；则对于任意的评估项目 $X:U$ ， m 个专家分别给出它的评价：

$$\begin{aligned} & m_{1,A1}(X), m_{1,A2}(X), \dots, m_{1,An}(X), \\ & m_{2,A1}(X), m_{2,A2}(X), \dots, m_{2,An}(X), \\ & m_{m,A1}(X), m_{m,A2}(X), \dots, m_{m,An}(X). \end{aligned}$$

对评估项目 X 不同的基本概率，赋值可由下式计算得出：

$$m_i(A_j) = \frac{m_i, A_j(X)}{\sum_{j=1}^n m_i, A_j(X)}, \quad i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n. \quad (2)$$

由上式可以得出证据理论中的概率函数 $m_i(A_j)$ 。它根据不同评委给出的评价度很好地构造了一个 mass 函数。通过这样的方式，不仅实现了 mass 函数的确定，而且很大程度上保留了各个评委给出的意见特点。

2) 利用多个证据的合成规则进行合成。

关于多个证据的合成规则，有以下定义：

定义 2 设 m_1, m_2, \dots, m_n 是一组焦元为 A_i 的 mass 函数 ($i=1,2,\dots,n$)，D-S 合成规则如下：

$$m_{(A)} = \begin{cases} 0; A = \emptyset \\ \frac{1}{K} \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j); A \neq \emptyset \end{cases}, \quad A_i, B_j \in 2^W. \quad (3)$$

式中： $K = \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j); A \neq \emptyset$ ，是证据 m_1, m_2 的冲突度。

3) 多源信息的融合。

在信息的收集和整理过程中，经常会遇到专家的意见有冲突。如何在最合理的情况下去融合各个专家的结果是一个重要的问题。笔者采用证据间距离函数的概念来解决这个问题，过程如下：

假设现在有项评估结果 m_1, m_2 ，那么这 2 个评估结果之间距离可以采用下面的方式来计算：

$$d(m_1, m_2) = \sqrt{\frac{1}{2} (M_1, M_2)^T D (M_1, M_2)}. \quad (4)$$

m_1, m_2 距离的具体算法为

$$d(m_1, m_2) = \sqrt{\frac{1}{2} ((M_1, M_1) + (M_2, M_2) - 2(M_1, M_2))}. \quad (5)$$

式中 $D = D_{ij} = \frac{A_i \cap A_j}{A_i \cup A_j}$ ， $I, j=1,2,\dots,2^W$ ，是一个 $2^W \times 2^W$ 阶矩阵，

$$(M_1, M_2) = \sum_{i=1}^{2^W} \sum_{j=1}^{2^W} m_1(A_i) m_2(A_j) D_{ij}. \quad (6)$$

2 个证据 m_1, m_2 的相似程度为 Sim_{ij} ，即得：

$$\text{Sim}_{ij}(m_i, m_j) = 1 - d(m_i, m_j). \quad (7)$$

通过计算，可以获得一个关于相似度的矩阵 SMM，基于此能够考虑证据体之间的一致度。

$$\begin{matrix} 1 & S_{12} & \dots & S_{1j} & \dots & S_{1k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \text{SMM} = S_{i1} & S_{i2} & \dots & S_{ij} & \dots & S_{ik} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{k1} & S_{k2} & \dots & S_{kj} & \dots & 1 \end{matrix}$$

证据之间的支持可信度定义为：

$$\text{Sup}(m_i) = \sum_{i=1, j=1}^k \text{Sim}_{i,j}(m_i, m_j), \quad i=1,2,\dots,k. \quad (8)$$

证据之间的信度定义为：

$$\text{Crd}_i = \frac{\text{Sup}(m_i)}{\sum_{i=1}^k \text{Sup}(m_i)}, \quad i=1,2,\dots,k. \quad (9)$$

由此，可以得到一个代表证据的信度矩阵。定义 α_i 为第 i 个证据的折扣系数如下：

$$\alpha_i = \frac{\text{Crd}_i}{\max \text{Crd}_i}, \quad i=1,2,\dots,k. \quad (10)$$

利用折扣系数，通过经典的组合规则得到最终融合结果，下面用具体案例介绍此过程。

3 案例分析

某型柴油机出现异常的振动，经过专家讨论，认定该问题属于风险等级较高的情况，需及时针对问题提出解决方案。首先，评审专家组通过头脑风暴法，确立该次修理风险因素有“认识不足”“技术不足”“采购障碍”和“检测遗漏”。以风险因素“认识不足”为例，利用文中方法对该风险点进行风险评估控制，其中风险因素“认识不足”可能会引发“修理不当”“安装不当”“人员受伤”等风险。

针对“认识不足”这一风险因素，专家在各个阶段给出的风险影响值 (0~1) 如表 1 所示。

表 1 风险因素“认识不足”专家风险影响值

风险因素	风险后果	专家 1	专家 2	专家 3
认识不足	修理不当	0.8	0.7	0.5
		0.5	0.6	0.6
		0.6	0.3	0.8
		0.6	0.2	0.7
认识不足	安装不当	0.1	0.2	0.4
		0.3	0.2	0.1
		0.3	0.5	0.1
		0.1	0.1	0.2
认识不足	人员受伤	0.1	0.1	0.1
		0.2	0.2	0.3
		0.1	0.2	0.1
		0.3	0.7	0.1

从表中可以看到：每位专家对风险因素给出的影响值有 4 项，这是因为在项目进行过程中，专家对于各个风险因素的认识可能会发生改变。柴油机的修理过程按照工序可分为检测、拆卸、修理和回装 4 个阶段，在不同的阶段，专家与工程人员进行了交流和调研，对问题的认识可能会随着计算和分析而变化；因此，给出了不同的风险影响值。运用模糊集对专家给出的风险影响值进行处理，对风险后果“修理不当”进行分析，计算步骤如下：

1) 将专家对风险后果“修理不当”的风险影响值遴选出来，得到专家关于风险后果“修理不当”的模糊集矩阵：

$$U = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.7 & 0.5 \\ 0.5 & 0.6 & 0.6 \\ 0.6 & 0.3 & 0.8 \\ 0.6 & 0.2 & 0.7 \end{bmatrix}$$

对每位专家意见取均值，可得到风险后果“修理不当”的粗评结果 $E_1=[0.62,0.45,0.65]$ 。重复上述步骤，可得到风险后果“安装不当”“人员受伤”的粗评结果 E_2 、 E_3 ：

$$E_2=[0.2,0.25,0.2], E_3=[0.18,0.3,0.15]$$

2) 将风险因素“认识不足”导致的“修理不当”“安装不当”“人员受伤”等风险后果的粗评结果进行综合，可得到专家关于风险因素“认识不足”的评估表如表 2 所示。

表 2 风险因素“认识不足”评估

风险因素	风险后果	专家 1	专家 2	专家 3
认识不足	修理不当	0.62	0.45	0.65
	安装不当	0.20	0.25	0.20
	人员受伤	0.18	0.30	0.15

依据表 2 构建专家关于“认识不足”这一风险因素的粗评估矩阵：

$$M_1 = M^T = \begin{bmatrix} 0.62 & 0.2 & 0.18 \\ 0.45 & 0.25 & 0.3 \\ 0.65 & 0.2 & 0.15 \end{bmatrix}$$

依据多个证据的合成规则

$$m_{(A)} = \begin{cases} 0; A = \emptyset \\ \frac{1}{K} \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j); A \neq \emptyset \end{cases}$$

得出合成后的结果 $K=0.800$ ， $m_{(A)}=0.909$ ， $m_{(B)}=0.05$ ， $m_{(C)}=0.041$ ，利用不确定冲突信息的融合手段来对评价结果进行进一步的处理：

计算评价结果之间的距离矩阵

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0.15 & 0.03 \\ 0.15 & 0 & 0.18 \\ 0.03 & 0.18 & 0 \end{bmatrix}$$

计算该矩阵的相似度矩阵

$$SMM = \begin{bmatrix} 1 & 0.85 & 0.97 \\ 0.85 & 1 & 0.82 \\ 0.97 & 0.82 & 1 \end{bmatrix}$$

计算各个矩阵的信度，并计算折扣系数：

$$Cr_d=[0.345,0.316,0.339], \alpha=[1,0.916,0.982]$$

运用证据融合理论融合这 3 个评价结果：

$$m_{(A)}=0.9, m_{(B)}=0.05, m_{(C)}=0.05$$

从该结果可知：在对风险因素“认识不足”的分析中，专家对于“修理不当”这一风险后果的评估是最高的。针对此项风险，可通过加强维修人员的技能培训，实现维修过程的规范化操作来进行控制。通过上述方法，可将修理过程的所有风险因素进行评价，进而找出关键风险因素，提出整个维修过程中的风险控制措施。

4 结束语

笔者提出基于模糊证据认知图的风险评估方法，从“风险因素”“风险后果”和“风险损失”3 个层面进行分析，将专家意见模糊化处理，利用证据理论对评估意见进行融合得出最终评估结果，并提出针对性措施。案例通过柴油机维修中“认识不足”这一风险因素的分析，得出针对此项风险因素的控制措施，证明了模糊证据认知图风险评估方法可对装备维修风险评估进行过程规范，为装备维修决策提供依据，可有效实现装备维修风险管理。

参考文献：

[1] CHANG Y H, WANG Y C. Significant human risk factors in aircraft maintenance technicians[J]. Safety Science, 2010, 48: 54-62.
 [2] 陈永刚. 风险矩阵在民航机务维修质量风险管理中的应用[J]. 工业工程与管理, 2014, 19(1): 138-142.

由图 8 可知：最大后坐位移为 3.775 mm，最大前冲位移为 0.676 mm。由图 9 可知：最大后坐速度为 0.823 m/s，最大前冲速度为 0.431 m/s。

通过对 2 组仿真结果的对比可知：2 组最大后坐位移和最大后坐速度非常接近，但在最大前冲位移和最大前冲速度上有差异。

6 结论

笔者对验证所加炮膛合力载荷是否准确提供了方法，在 Matlab/Simulink 软件下实现了环形弹簧变刚度的后坐缓冲运动仿真。通过对卸载刚度变化和不变化仿真结果进行分析，得出环形弹簧卸载刚度的变化不会影响到最大后坐位移、最大后坐速度结果的仿真，但卸载刚度的变化使得最大前冲位移

(上接第 49 页)

参考文献：

[1] 宋太亮. 装备保障性系统工程[M]. 北京：国防工业出版社, 2008: 47.

[2] 王凯, 孙万国. 武器装备军事需求论证[M]. 北京：国防工业出版社, 2008: 22.

[3] 宋怀常. 中国人的思维危机[M]. 天津：天津人民出版社, 2010: 29.

(上接第 58 页)

[3] BEVILACQUA M, CIARAPICA F E, GIACCHETTA G. Critical chain and risk analysis applied to high-risk industry maintenance: A case study[J]. International Journal of Project Management, 2009, 27: 419-432.

[4] 何旭洪, 童节娟, 薛大知. 应用 PSA 方法进行核电站维修风险管理[J]. 清华大学学报, 2006, 46(3): 441-443.

和最大前冲速度增大。该研究对仿真环形弹簧后坐缓冲运动具有一定的指导意义，在工程实践中具有良好的参考价值。

参考文献：

[1] 朵英贤, 马春茂. 中国自动武器[M]. 北京：国防工业出版社, 2014: 262-305.

[2] 钱林方. 火炮弹道学[M]. 北京：北京理工大学出版社, 2009: 19-127.

[3] 高跃飞. 火炮反后坐装置设计[M]. 北京：国防工业出版社, 2010: 10-56.

[4] 薄玉成, 王惠源, 李强. 自动机结构设计[M]. 北京：兵器工业出版社, 2009: 317-329.

[5] 牛碧凯. 航空转管机枪发射动力学研究[D]. 太原：中北大学, 2015: 15-18.

[4] Jonathan Baron. 思维与决策[M]. 北京：中国轻工业出版社, 2009: 5-14.

[5] 郝玉涛, 王超伟, 赵洪义, 等. 基于组合评价法的装备保障方案评价[J]. 兵工自动化, 2018, 37(2): 62-65.

[6] 马绍民. 综合保障性工程[M]. 北京：国防工业出版社, 1995: 93-94.

[7] 王健, 古平, 卜昭锋, 等. 装备保障数据需求分析方法与建模[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(7): 136-140.

[5] VINNEM J E, BYE R, GRAN B A. Risk modelling of maintenance work on major process equipment on offshore petroleum installations[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012, 25: 274-292.

[6] 吴同晗, 张仕新, 陈春良, 等. 基于能力需求的维修保障人员专业种类确定方法[J]. 兵工自动化, 2018, 37(6): 73-77.