

## 基于模糊贝叶斯网的危害性分析方法

翟胜<sup>1\*</sup>, 师五喜<sup>2,3</sup>, 修春波<sup>2</sup>

(1. 天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 电气工程与自动化学院, 天津 300387;

3. 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

(\* 通信作者电子邮箱 zhaishengdl@163.com)

**摘要:**针对传统的故障模式、影响与危害性分析(FMECA)方法不足的问题,提出了一个基于模糊贝叶斯网的危害性分析方法。该方法将模糊理论与贝叶斯网推理技术结合起来,用三角模糊数来描述专家的模糊评分值;通过模糊集合映射,将其转化为评级的模糊子集;以置信结构的模糊规则,表示故障模式的属性与危害度之间的关系;利用贝叶斯网络推理算法综合置信结构的模糊规则,通过贝叶斯网推理得到模糊子集形式的危害度,再经过去模糊计算,得到故障危害等级的清晰值,从而确定故障模式的危害程度。实验结果表明,所提方法能够提高传统分析方法的准确性和应用范围。

**关键词:**模糊数;贝叶斯网络;置信结构;危害性分析

**中图分类号:** TP302.7 **文献标志码:** A

## Criticality analysis method based on fuzzy Bayesian networks

ZHAI Sheng<sup>1\*</sup>, SHI Wuxi<sup>2,3</sup>, XIU Chunbo<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

3. Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** Considering the defects of traditional Failure Modes, Effect and Criticality Analysis (FMECA), a criticality analysis method based on fuzzy Bayesian networks was proposed. This approach combined the fuzzy theory with Bayesian network techniques, and fuzzy judgments of experts were described using triangular fuzzy numbers which were transformed into forms of fuzzy subsets of ranking through mapping of fuzzy sets. The fuzzy rules with belief structure were used to represent the relationship between the properties and hazards of the failure modes. The Bayesian network inference algorithms were used to synthesize the fuzzy rules of belief structure, and the hazard degree in the form of fuzzy subsets was obtained by Bayesian inference, through defuzzification calculation, a precise value of fault hazard ranking was gained to determine the hazard degree of the failure mode. The experimental results show that the proposed method is able to improve the accuracy and application range of the traditional analysis method.

**Key words:** fuzzy number; Bayesian Network (BN); belief structure; criticality analysis

## 0 引言

故障模式、影响与危害性分析(Failure Modes, Effect and Criticality Analysis, FMECA)作为一种故障模式严重程度的分析工具,在设备的故障危害性分析中被广泛应用<sup>[1-3]</sup>。FMECA中常用的危害性分析方法有风险优先数(Risk Priority Number, RPN)方法和危害性矩阵方法<sup>[4]</sup>,其中RPN方法的应用更为广泛。RPN方法包含故障模式所发生的概率( $O$ )、严重度等级( $S$ )及被检测的难度等级( $D$ )三个属性。根据各故障模式的RPN,就可以确定各子系统故障风险的大小,确定影响系统可靠性的薄弱环节,并采取相应的预防或改进措施,使RPN值达到可接受的水平,从而达到提高系统可靠性的目的。

但是传统FMECA在解决实际问题时也存在诸多不足<sup>[5-6]</sup>,主要有几个方面:由于系统的复杂以及数据的不完

备,通常是很难给出 $O$ 、 $S$ 和 $D$ 确切的数据;三个参数的不同组合,在RPN值相同的情况下,可能表示完全不同程度的危害影响;由于RPN参数之间的相对重要性是不同的,因此参数的权重也是不相同的。

为了解决这些问题,提高FMECA的应用性能,国内外学者进行了大量的研究。Xu等<sup>[7]</sup>和Antonio<sup>[8]</sup>采用了模糊规则的FMECA模型,来研究RPN的三个属性与风险度之间的关系,解决了传统分析方法的相对权重以及同分值不同严重程度的问题。但是,使用模糊MAX-MIN等方法进行推理时,可能导致有用信息的损失。为此,Liu<sup>[9]</sup>提出基于模糊证据推理和灰色关联理论方法,把带置信度的IF-THEN规则与灰色关联理论引进到故障风险分析当中。但是,在综合规则过程中涉及很复杂的计算。

近年来贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)作为不确定性知识表示和推理的先进技术,被广泛地应用到复杂系统的可

收稿日期:2014-06-30;修回日期:2014-09-03。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61203302)。

作者简介:翟胜(1969-),男,辽宁大连人,高级工程师,博士研究生,主要研究方向:机电一体化设备、系统可靠性分析; 师五喜(1964-),男,甘肃秦安人,教授,博士生导师,主要研究方向:机电一体化设备、机器人、智能控制; 修春波(1978-),男,黑龙江大庆人,副教授,博士,主要研究方向:智能控制、模式识别。

可靠性分析<sup>[10]</sup>、风险分析<sup>[11]</sup>等领域。贝叶斯网络是一个概率推理网络,可以进行高效的双向推理。在推理过程中,需要使用精确的先验概率。而现实的系统中,可利用的历史数据有限,很难将事件的发生概率用确定的数值表达。

文献[12]把模糊数引入贝叶斯推理公式中,由于三角模糊数互相乘积后,其结果不再是三角模糊数形式,会使结果产生较大的误差。文献[13]中专家给出语言信息比较模糊,容易影响推理结果;对原始模糊信息进行清晰化处理,在清晰化过程中,会丢失许多信息。Yang等<sup>[6]</sup>提出了在FMECA的基础上,建立基于模糊规则下的贝叶斯推理模型,但其在模糊输入信息的处理方法上,会丢失许多信息,从而影响推理结果的准确性;用效用函数方法进行排序,使得在确定危害性级别上不够清晰。

本文提出了基于模糊贝叶斯推理的危害性分析方法。在该方法中,用模糊数来描述专家在评分过程中的模糊性,符合客观实际;通过模糊变换,将输入信息转化为评级的模糊子集形式;并充分利用贝叶斯网络的推理技术、置信结构模糊规则的信息表达能力强的特点,解决传统方法导致的危害度偏差大的问题,利用加权平均去模糊方法,得到故障模式危害等级的精确评估和清晰评级,并在某加工中心的液压系统中进行了验证。

## 1 贝叶斯网络

BN是表示随机变量间统计依赖关系的有向无环图(Directed Acyclic Graph, DAG),可以表示为 $B = (G, P) = (X, E, P)$ ,其中 $G$ 是一个表示变量域的DAG, $P$ 表示相应的一组条件概率集合, $X$ 表示随机变量集, $X = \{x_1, x_2, \dots, x_l\}$ , $G$ 中每个节点表示一个随机变量,同时每个节点都对应着一个条件概率表(Conditional Probability Table, CPT), $E$ 为有向边的集合,由父节点指向子节点,每条边表示变量间的依赖关系<sup>[14]</sup>。DAG定性描述了BN的网络结构,CPT则定量地描述了BN的网络参数。在BN中,将不具有父节点的节点定义为根节点,不具有子节点的节点定义为叶节点。

BN的主要特点是节点可以表示多种状态;通过CPT可以表达节点间的不确定逻辑关系;利用条件独立假设,大大简化概率推理过程。

在BN中规定,图中的节点 $x_i$ 在给定 $x_i$ 父节点的情况下,条件独立于 $x_i$ 父节点之外的其他非子孙节点集合。如果用 $A(x_i)$ 表示 $x_i$ 父节点之外的其他非子孙节点子集,用 $\pi(x_i)$ 表示 $x_i$ 的父节点,则有:

$$P(x_i | A(x_i), \pi(x_i)) = P(x_i | \pi(x_i)) \quad (1)$$

假设 $x_1, x_2, \dots, x_l$ 是BN中的节点,网络中所有节点的联合概率如下:

$$P(X) = P(x_1, x_2, \dots, x_l) = \prod_{i=1}^l P(x_i | \pi(x_i)) \quad (2)$$

可见,BN可以表达变量的联合概率分布,并且使变量的联合概率求解大大简化。

建立BN的主要目的是进行概率推理,即在给定的网络结构和已知证据下,推算节点变量的联合概率、条件概率。

由于BN节点可以表达多种状态,设BN的根节点变量为 $x_i (i = 1, 2, \dots, l)$ ,其状态为 $v_i (v_i = 0, 1, \dots, r-1)$ ;中间节点变量 $y_j (j = 1, 2, \dots, m)$ ,其状态为 $w_j (w_j = 0, 1, \dots,$

$s-1)$ ;叶节点变量为 $T$ ,其状态为 $Q_T (Q_T = 0, 1, \dots, n-1)$ 。已知各个根节点的各种状态的概率为 $P(x_i = v_i)$ ,在CPT确定的条件下,由桶消元法可以求得叶节点 $T = Q_T$ 时的概率 $P(T = Q_T)$ 为:

$$P(T = Q_T) = \sum_{x_1, x_2, \dots, x_l, y_1, y_2, \dots, y_m} P(x_1, x_2, \dots, x_l, y_1, y_2, \dots, y_m, T = Q_T) = \sum_{\pi(T)} P(T = Q_T | \pi(T)) \times \sum_{\pi(y_1)} P(y_1 | \pi(y_1)) \cdots \times \sum_{\pi(y_j)} P(y_j | \pi(y_j)) \cdots \times \sum_{\pi(y_m)} P(y_m | \pi(y_m)) P(x_1) \cdots P(x_l) \cdots P(x_l) \quad (3)$$

## 2 基于模糊贝叶斯推理的危害性分析方法

### 2.1 模糊评价等级的表示

FMECA中的评价等级常常是一个模糊的概念,采用模糊集合理论进行评级更为符合实际情况。专家们依据事先定义的模糊评级集合以及自己的经验来给出模糊评分值。专家给出一个等级区间,利用该等级区间构成模糊数。

在专家评判之前,首先要定义 $O$ 、 $S$ 和 $D$ 属性等级的模糊评级集合。本文采用变量 $O_i (i = 1, 2, \dots, 7)$ 来表示发生概率的等级,相应的评级值定义为{非常低,低,稍低,中等,稍高,高,非常高},即 $\{O_1, O_2, O_3, O_4, O_5, O_6, O_7\}$ ;用语言变量 $S_j (j = 1, 2, \dots, 5)$ 来表示严酷度的等级,相应的评级值定义为{非常轻,轻,中度,较严重,严重},即 $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ ;用语言变量 $D_k (k = 1, 2, \dots, 6)$ 来表示被检测难度的等级,相应的评级值定义为{非常容易,容易,中等,较难,难,非常难},即 $\{D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, D_6\}$ ,图1给出了各属性等级的隶属度函数 $\mu_{\lambda}(x)$ 。对于表示危害水平的危害度,用变量 $C_h (h = 1, 2, 3, 4)$ 来描述危害性的级别,相应的评级值定义为{很低,低,中,高},即 $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ 。

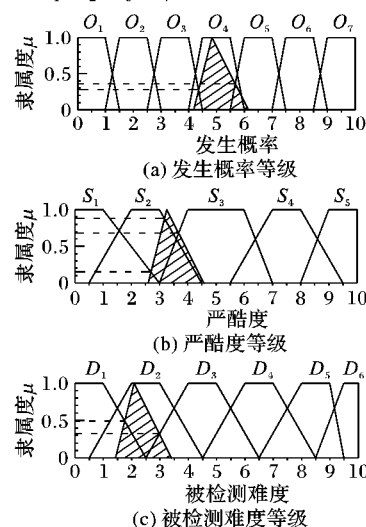


图1 模糊评判等级的表示图

模糊数有多种形式,如三角形模糊数、梯形模糊数、正态模糊数和LR型模糊数等。由于三角模糊数表达简单,其参照函数处理较为方便,代数运算较为容易。本文采用三角模糊数的形式来表示专家的评估值。当专家们给出各自的 $O$ 、 $S$ 和 $D$ 的评估值后,通过算术平均法综合专家们的评判意见,得出专家群体最终的评判结果。经过如图1的转换,得到相应

属性评判的模糊语言集合 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{S}$ 和 $\tilde{D}$ 。

图 1 中三角形(阴影部分)表示专家群体评判的结果。即认为当专家给定一个评估区间时,其中间值具有最大的可能性,其他值向中值两侧减弱。该模糊数与各语言变量集相交,交点的最高点对应的隶属度,构成了一个评级的模糊语言集合。对于属性 $O$ ,该模糊数与语言变量集 $O_3$ 、 $O_4$ 、 $O_5$ 相交,该区间的中值对 $O_4$ 的隶属度为 1,区间对 $O_3$ 交点的最高点对应的隶属度为 0.28,对 $O_5$ 交点的最高点对应的隶属度为 0.37,最终构成的模糊语言集合 $\tilde{O}$ 如下:

$$\tilde{O} = \frac{0}{O_1} + \frac{0}{O_2} + \frac{0.28}{O_3} + \frac{1}{O_4} + \frac{0.37}{O_5} + \frac{0}{O_6} + \frac{0}{O_7} \quad (4)$$

也可表示为 $\tilde{O}(0,0,0.28,1,0.37,0,0)$ 。

## 2.2 置信结构模糊规则库的建立

传统模糊规则库的模型,是用语言变量代替不精确数值来处理不精确的问题。在模糊规则中,首先定义用语言变量表示的前提和结论。传统的 IF-THEN 规则可以表述如下:

$$R_k: \text{IF } A_1^k \text{ and } A_2^k \cdots \text{ and } A_M^k \text{ THEN } B^k$$

其中: $A_M^k$ 表示一个前提的模糊集, $B^k$ 表示一个结论的模糊集。

IF-THEN 规则综合起来就组成了一个基本的模糊规则库。虽然传统的规则库用来表示模糊功能,但前提的语言变量发生轻微的变化其结论可能没有变化。同时,由于事件关系的不确定性,加上专家经验及证据的局限,前提和结论之间的关系可能不能完全确定。本文采用置信结构的模糊规则形式,用结论的置信度来表示事件关系的可信任程度。

结论带置信度( $\beta$ )的置信结构模糊规则库定义<sup>[15-16]</sup>如下:

$$R_k: \text{IF } A_1^k \text{ and } A_2^k \cdots \text{ and } A_M^k, \text{ THEN } \{(\beta_1^k, B_1^k), (\beta_2^k, B_2^k), \cdots, (\beta_N^k, B_N^k)\}$$

$$\text{其中 } \sum_{j=1}^N \beta_j^k = 1 (0 \leq \beta_j^k \leq 1)。$$

对于基于 RPN 的置信结构的模糊规则可以表示如下:

$$R_1: \text{IF } O_1 \text{ and } S_1 \text{ and } D_1, \text{ THEN } \{(1, C_1), (0, C_2), (0, C_3), (0, C_4)\}$$

$$R_2: \text{IF } O_1 \text{ and } S_1 \text{ and } D_2, \text{ THEN } \{(0.9, C_1), (0.1, C_2), (0, C_3), (0, C_4)\}$$

其中:(1,  $C_1$ )表示结果为很低,且置信度为 1; (0.9,  $C_1$ )表示结果为很低,且置信度为 0.9。

可以看出带置信度的模糊规则的优点,即输入从 $D_1$ 到 $D_2$ 轻微地变化并没有影响输出 $C_1$ 的定义,同时通过置信度在结论中反映出来输入的轻微变化。而传统的 IF-THEN 规则却不具有这样的表达能力。

置信结构的模糊规则能够有效地利用各种类型的信息,建立输入和输出之间的非线性模型。相对于传统的 IF-THEN 规则,它提供了一种能够包含更多信息、更加接近实际的知识表达方式。

在日趋复杂的故障模式下,迫切需要精确的危害性分析,由于传统的模糊规则库的知识表示能力受到很大的限制,因此,在专家评判的基础上,建立基于 RPN 置信结构的模糊规则库(表 1)。对于不同的系统,基于 RPN 置信结构的模糊规则库是不同的。

表 1 置信结构的模糊规则库

规则	前提			结论			
	发生概率等级( $O$ )	严酷度等级( $S$ )	被检测难度等级( $D$ )	危害性等级( $C$ )			
				很低( $C_1$ )	低( $C_2$ )	中( $C_3$ )	高( $C_4$ )
1	非常低( $O_1$ )	非常轻( $S_1$ )	非常容易( $D_1$ )	1	0	0	0
2	非常低( $O_1$ )	非常轻( $S_1$ )	容易( $D_2$ )	0.9	0.1	0	0
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
209	非常高( $O_7$ )	严重( $S_5$ )	难( $D_5$ )	0	0	0.05	0.95
210	非常高( $O_7$ )	严重( $S_5$ )	非常难( $D_6$ )	0	0	0	1

## 2.3 基于 BN 的模糊规则的综合

由于 BN 具有描述事件之间不确定的非线性关系的能力,能够很好地表达置信结构的模糊规则关系。所以,将基于 RPN 置信结构的模糊规则的推理用 BN 来实现。

BN 构建步骤如下:

1) 确定故障模式的特征属性与网络节点的对应关系。

2) 根据节点之间的因果关系,确定父节点、子节点,建立表示节点间相互依赖关系的 DAG。

3) 确定节点的先验概率和 CPT 概率分布参数。

依据 FMECA 中故障模式的属性之间关系,定义 $N_O$ 、 $N_S$ 和 $N_D$ (对应前提属性 $O$ 、 $S$ 和 $D$ )为父节点,而节点 $N_C$ (结论属性 $C$ )为节点 $N_O$ 、 $N_S$ 和 $N_D$ 的公共子节点。

这样,就将置信结构的模糊规则库转化为 BN 结构形式。而对故障危害级别的推理,就简化为对节点 $N_C$ 概率的计算。计算节点 $N_C$ 的概率,需要确定 $N_C$ 的条件概率 $P(C_h | O_i, S_j, D_k)$ ,将置信结构的模糊规则库表示为条件概率表的形式,就得到 $N_C$ 的条件概率表(见表 2)。例如,表 1 中的规则 2 可以表

示的条件概率为 $P(C_h | O_1, S_1, D_2) = (0.9, 0.1, 0, 0)$ 。

依据图 1 得到的模糊集合 $\tilde{O}$ 、 $\tilde{S}$ 和 $\tilde{D}$ 。经归一化处理,得出 $\alpha_i$ 、 $\alpha_j$ 、 $\alpha_k$ ,并将其作为 BN 的属性节点的先验概率。即节点 $N_O$ 先验概率 $P(O_i) = \alpha_i$ ,节点 $N_S$ 的先验概率为 $P(S_j) = \alpha_j$ 以及节点 $N_D$ 的先验概率为 $P(D_k) = \alpha_k$ 。所以,由式(3)可以得出节点 $N_C$ 的概率为:

$$P(C_h) = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^6 P(C_h | O_i, S_j, D_k) \cdot P(O_i)P(S_j)P(D_k); h = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

## 2.4 危害性级别的排名

为了确定不同故障模式的危害性级别,需要对它们进行危害性级别的排序。式(5)得到的节点 $N_C$ 的概率即危害度值集,是一个模糊子集形式,本文采用加权平均法进行去模糊化。即选择一个合适的级别权重系数矩阵,去乘模糊子集形式的危害度值集,就得到危害等级的级别值,再根据级别值大小进行危害性排序。这样,就可以清晰地判别出危害等级所

处的级别区间的位置和大小,有利于快速、准确地作出决策。

在表 1 的模糊规则库中,危害等级分成  $C_1 \sim C_4$  四个级别, $C_1$  为危害性最低, $C_4$  为危害性最大。所以,将级别系数矩阵定义为  $W = (w_1, w_2, w_3, w_4)$ ,并根据需要选取合适的权重

系数。把最终计算出的  $P(C_k)$  作为模糊子集  $P$ ,再乘以级别系数矩阵  $W^T = (w_1, w_2, w_3, w_4)^T$ ,就得出最终的级别值:

$$R = PW^T = (P(C_1), P(C_2), P(C_3), P(C_4)) \cdot (w_1, w_2, w_3, w_4)^T \quad (6)$$

表 2  $N_c$  的条件概率表

$C$	$O_1$										$O_7$									
	$S_1$					$S_3$					$S_1$					$S_5$				
	$D_1$	$D_2$	...	$D_6$	...	$D_1$	$D_2$	...	$D_6$	...	$D_1$	$D_2$	...	$D_6$	...	$D_1$	$D_2$	...	$D_6$	...
$C_1$	1	0.9	...	0	...	0	0	...	0	...	0	0	...	0	...	0	0	...	0	...
$C_2$	0	0.1	...	0.1	...	0.2	0.1	...	0	...	0	0	...	0	...	0	0	...	0	...
$C_3$	0	0	...	0.9	...	0.8	0.9	...	0.7	...	1	0.9	...	0.5	...	0.25	0.2	...	0	...
$C_4$	0	0	...	0	...	0	0	...	0.3	...	0	0.1	...	0.5	...	0.75	0.8	...	1	...

3 应用实例

以某立式加工中心的液压系统为研究对象,对本文提出的方法的有效性进行验证。该加工中心中的液压系统主要的功能是实现链式刀库的刀链驱动、主轴箱的配置、刀具的安装和主轴高低速的转换等。它采用变量叶片泵为系统提供动力油,同时,为了防止因系统断电以及其他故障造成的液压泵压力突降对系统的影响,在泵的后方设置止回阀,从而避免机械部件的冲击损坏。

通过对加工中心的液压系统进行故障模式分析,可以得出,该液压系统的主要的故障模式有电磁阀故障( $FM_1$ ),气、液控制失灵( $FM_2$ ),零部件损坏( $FM_3$ ),液、气、油渗漏或堵塞( $FM_4$ ),电机不能启动( $FM_5$ ),零部件松动( $FM_6$ )等。

首先建立一个由 4 位专家组成的专家小组,专家们根据各自的经验知识对各故障模式进行评判。故障模式划分等级

的评分参照王桂萍等<sup>[2]</sup>提出的评分标准。用算术平均法综合专家们的评级,得出专家群体的评判结果。4 位专家给出的  $FM_1$  三个属性的评估见表 3。

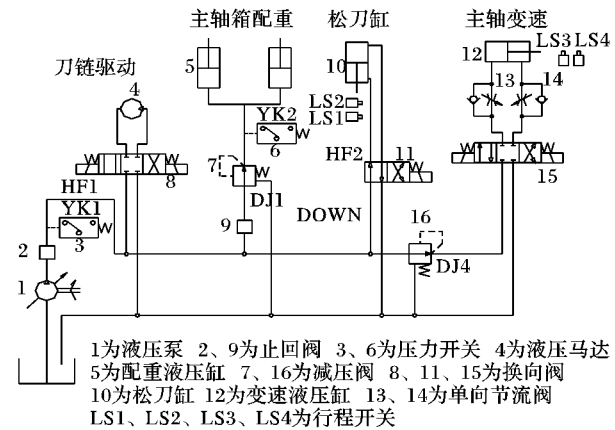


图 2 某加工中心液压系统原理

表 3 专家对  $FM_1$  三个属性的评估与转换

名称	发生概率等级 ( $O$ )	严酷度等级 ( $S$ )	被检测难度等级 ( $D$ )
专家 1	(0.8, 1.6, 2.6)	(1.3, 2.5, 2.8)	(0.3, 1.2, 2.2)
专家 2	(0.6, 1.8, 2.7)	(1.2, 2.4, 2.9)	(0.5, 1.5, 2.5)
专家 3	(0.5, 1.5, 2.5)	(1.3, 2.3, 3.1)	(0.3, 1.4, 2.4)
专家 4	(0.5, 1.7, 2.6)	(1.4, 2.5, 3.2)	(0.4, 1.4, 2.3)
群体	(0.6, 1.65, 2.6)	(1.3, 2.43, 3.0)	(0.38, 1.38, 2.35)
$\tilde{O}, \tilde{S}, \tilde{D}$	(0.6, 1, 0.07, 0, 0, 0)	(0.54, 1, 0, 0, 0)	(0.85, 0.75, 0, 0, 0)
$\alpha$	(0.36, 0.6, 0.04, 0, 0, 0)	(0.35, 0.65, 0, 0, 0)	(0.53, 0.47, 0, 0, 0)

下面以  $FM_1$  的属性  $O$  为例,分析  $\alpha_i$  计算过程。4 位专家对  $FM_1$  的属性  $O$  给出各自的评判为 (0.8, 1.6, 2.6), (0.6, 1.8, 2.7), (0.5, 1.5, 2.5), (0.5, 1.7, 2.6)。依据三角模糊数的运算规则,计算出它们的算术平均值为 (0.6, 1.65, 2.6),把它作为专家群体对属性  $O$  的最终评估。

根据图 1 的变换,得到一个模糊集合  $\tilde{O}$ ,即  $\tilde{O} = (0.6, 1, 0.07, 0, 0, 0)$ 。经过归一化计算,  $\alpha_i = (0.36, 0.6, 0.04, 0, 0, 0)$ 。所以,节点  $N_o$  的先验概率  $P(O_i) = \alpha_i = (0.36, 0.6, 0.04, 0, 0, 0)$ ,节点  $N_s$  先验概率  $P(S_j) = \alpha_j = (0.35, 0.65, 0, 0, 0)$ ,节点  $N_d$  的先验概率  $P(D_k) = \alpha_k = (0.53, 0.47, 0, 0, 0, 0)$ 。

依据式(5)可得:

$$P(C_k) = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^5 \sum_{k=1}^6 P(C_k | O_i, S_j, D_k) \cdot P(O_i)P(S_j)P(D_k) = (0.82, 0.18, 0, 0)$$

故障  $FM_1$  的危害性级别可以表示为:  $\{(0.82, \text{很低}), (0.18, \text{低}), (0, \text{中等}), (0, \text{高})\}$ 。

同样,可以得到故障模式  $FM_2$  至  $FM_6$  的危害性级别值集: (0.586, 0.414, 0, 0), (0.331, 0.669, 0, 0), (0.61, 0.39, 0, 0), (0.633, 0.367, 0, 0), (0.677, 0.323, 0, 0)。

故障  $FM_1$  的危害性级别值为:

$$R_{FM_1} = PW^T = (p(C_1), p(C_2), p(C_3), p(C_4)) (w_1, w_2, w_3, w_4)^T = (0.82, 0.18, 0, 0) (1, 2, 3, 4)^T = 1.18$$

同样,可以计算出其他故障模式的危害性级别值:

$R_{FM2} = 1.414, R_{FM3} = 1.669, R_{FM4} = 1.39, R_{FM5} = 1.367, R_{FM6} = 1.323$ 。

最后的故障危害性排名为:  $R_{FM1} < R_{FM6} < R_{FM5} < R_{FM4} < R_{FM2} < R_{FM3}$ 。

图3是该加工中心液压系统的基于模糊BN的危害性分析模型,节点C是节点O、S和D的子节点,对于节点O、S和D

左边的数据是在故障  $FM_1$  状态下的先验概率(百分数表示),对于节点O,36.000对应  $\alpha_i(0.36, 0.6, 0.04, 0, 0, 0, 0)$  中的0.36,60.000对应  $\alpha_i(0.36, 0.6, 0.04, 0, 0, 0, 0)$  中的0.6,其他以此类推。推算节点C的结果为(82,18,0,0),即  $P(C_h) = (0.82, 0.18, 0, 0)$ ,经过去模糊化得到级别值(Rank Value)为1.180。

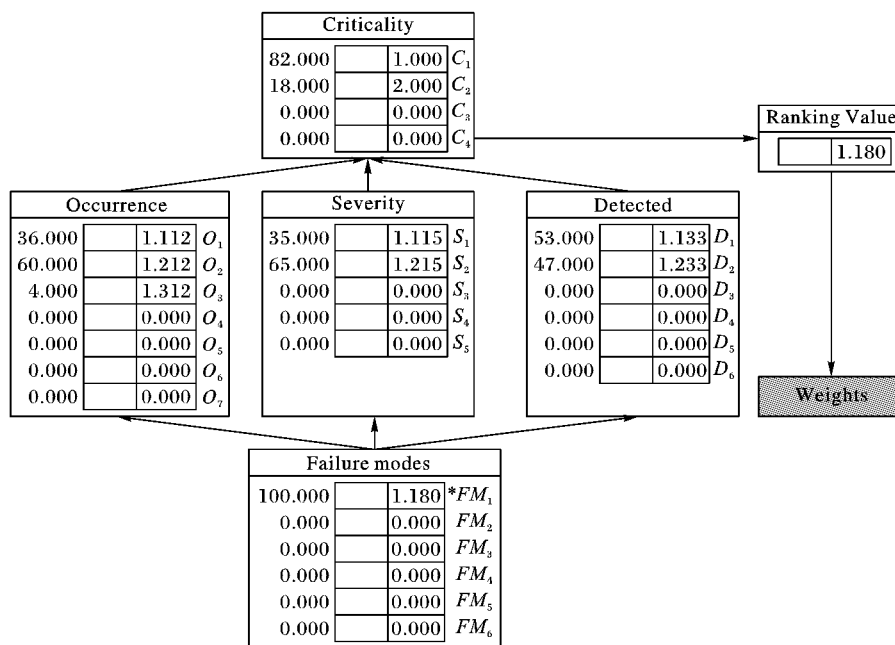


图3 某加工中心液压系统的危害性分析模型

这样,通过对液压系统的每个故障模式的危害性评估,清晰地得出危害度等级的排列次序,对液压系统的设计和维护提供了有力的决策支持。分析结果与实际情况是相一致的,从而验证了方法的可行性和实用性。

#### 4 结语

本文提出的危害性分析方法是在精确的客观数据难以获得的情况下,利用专家的知识,以主观数据为基础,在FMECA方法中结合模糊理论和贝叶斯网络推理技术,从而获得故障危害的等级值。

本文采用模糊数来描述专家的评分,其更为合理;采用置信结构的模糊规则库,解决了数据的不完备性以及RPN相同权重的缺欠等传统问题;利用贝叶斯网络推理算法,清晰、简洁地表达了RPN三个属性和危害度的非线性关系,推理过程更为高效;利用加权平均去模糊方法,使得故障危害等级更加清晰、明确,对系统的设计和维护提供简单、高效的决策支持。

本文方法的精确性,主要取决于以下几个环节:故障模式划分等级的评分标准、专家提供模糊评级信息的精确度、模糊信息变换的精确度和建立置信结构的模糊规则库的准确度。保证评分标准的合理,专家切合实际的评判,变换中信息损失的减少,符合实际的置信结构模糊规则库的建立,基本上就保证了本文方法的精确性。

从案例的分析中可以看出本文方法为进行危害性分析的人员提供了一个非常方便的工具,也可以应用于其他的风险评估系统。

#### 参考文献:

- [1] MANDAL S, MAITI J. Risk analysis using FMEA: fuzzy similarity value and possibility theory based approach[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(7): 3527-3537.
- [2] WANG G, JIA Y, SHEN G, et al. Fuzzy evaluation analysis on cooling system failure mode criticality of machining center[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 171-174. (王桂萍, 贾亚洲, 申桂香, 等. 加工中心冷却系统故障模式危害性模糊评价分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 171-174.)
- [3] SHAHIN A. Integration of FMEA and the Kano model: an exploratory examination[J]. International Journal of Quality and Reliability Management, 2004, 21(7): 731-746.
- [4] KANG R, SHI R. The technology and application of FMECA[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 32-35. (康锐, 石荣德. FMECA技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 32-35.)
- [5] HEERALAL G, SANJAY 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] YANG Z, BONSALLS, WANG J. Fuzzy rule-based Bayesian reasoning approach for prioritization of failures in FMEA[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2008, 5(3): 517-528.
- [7] XU K, TANG L, XIE M, et al. Fuzzy assessment of FMEA for engine systems[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 75(1): 17-29.
- [8] ANTONIO C. Fuzzy inference to risk assessment on nuclear engineering systems[J]. Applied Soft Computing, 2007, 7(1): 17-28.

(下转第3480页)

- (11):26-31. (马帅, 李佳, 刘旭东, 等. 图查询: 社会计算时代的新型搜索[J]. 计算机学会通讯, 2012, 8(11):26-31.)
- [2] WANG N, WANG B, LI X, *et al.* Subgraph queries over dynamic graph data[J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2014, 8(2):139-149. (王楠, 王斌, 李晓华, 等. 支持动态图数据的子图查询方法[J]. 计算机科学与探索, 2014, 8(2):139-149.)
- [3] YU G, GU Y, BAO Y, *et al.* Large scale graph processing on cloud computing environments[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2011, 34(10):1753-1767. (于戈, 谷峪, 鲍玉斌, 等. 云计算环境下的大规模图数据处理技术[J]. 计算机学报, 2011, 34(10):1753-1767.)
- [4] ADIYA B, BHALOTIA G, CHAKRABARTI S, *et al.* BANKS: browsing and keyword searching in relational databases[C]// *Proceedings of the 28th International Conference on Very Large Databases*. New York: VLDB Endowment, 2002:1083-1086.
- [5] AGRAWAL S, CHAUDHURI S, DAS G. DBXplorer: a system for keyword-based search over relational databases[C]// *Proceedings of the 18th International Conference on Data Engineering*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2002:5-16.
- [6] DING B, XU J, YU S, *et al.* Finding top-*k* min-cost connected trees in databases[C]// *Proceedings of the 23rd International Conference on Data Engineering*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007:836-845.
- [7] GOLEMBERG K, KIMELFELD B, SAGIV Y. Keyword proximity search in complex data graphs[C]// *Proceedings of the 2008 ACM Special Interest Group on Management of Data*. New York: ACM, 2008:927-940.
- [8] GUO L, SHAO F, BOTEV C, *et al.* Xrank: ranked keyword search over XML documents[C]// *Proceedings of the 2006 ACM Special Interest Group on Management of Data*. New York: ACM, 2003:16-27.
- [9] LI G, FENG J, BENG C O, *et al.* EASE: an effective 3-in-1 keyword search method over heterogeneous sources[J]. *Information Systems*, 2011, 36(2):248-266.
- [10] KIM S, LEE W, ARORA N R, *et al.* Retrieving keyworded subgraphs with graph ranking score[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(5):4647-4656.
- [11] HE H, WANG H, YANG J, *et al.* BLINKS: ranked keyword searches on graphs[C]// *Proceedings of the 2007 ACM Special Interest Group on Management of Data*. New York: ACM, 2007:305-316.
- [12] INDYK P, MOTWANI R. Approximate nearest neighbors: towards removing the curse of dimensionality[C]// *Proceedings of the 13th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing*. New York: ACM, 1998:604-613.
- [13] GIONIS A, INDYK P, MOTWANI R. Similarity search in high dimensions via hashing[C]// *Proceedings of the 25th International Conference on Very Large Databases*. New York: VLDB endowment, 1999:518-529.
- [14] MIN K, YANG L, WRIGHT J, *et al.* Compact projection: simple and efficient near neighbor search with practical memory requirements[C]// *Proceedings of the 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010:3477-3484.
- [15] BRODER A Z. On the resemblance and containment of documents [C]// *Proceedings of the 1997 International Conference on Compression and Complexity of Sequences*. Piscataway: IEEE, 1997:21-29.
- [16] DATAR M, IMMORLICA N, INDYK P, *et al.* Locality-sensitive hashing scheme based on p-stable distributions[C]// *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Computational Geometry*. New York: ACM, 2004:253-262.
- [17] YUAN P, SHA C, WANG X, *et al.* C-approximate nearest neighbor query algorithm based on learning for high-dimensional data [J]. *Journal of Software*, 2012, 23(8):2018-2031. (袁培森, 沙朝锋, 王晓玲, 等. 一种基于学习的高维数据 C-近似最近邻查询算法[J]. 软件学报, 2012, 23(8):2018-2031.)
- [18] KUKICH K. Technique for automatically correcting words in text [J]. *ACM Computing Surveys*, 1992, 24(4):377-439.
- 
- (上接第3450页)
- [9] LIU H, LIU L, BIAN Q, *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.
- [10] HELGE L, LUIGI P. Bayesian networks in reliability [J]. *Reliability Engineering System Safety*, 2007, 92(1):92-108.
- [11] NIMA K, FAISAL K, PAOL A. Safety analysis in process facilities: comparison of fault tree and Bayesian network approaches [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, 96(8):925-932.
- [12] CHEN D, YAO C. Reliability analysis of multi-state system based on fuzzy Bayesian networks and application in hydraulic system[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(16):175-183. (陈东宁, 姚成玉. 基于模糊贝叶斯网络的多态系统可靠性分析及在液压系统中的应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(16):175-183.)
- [13] MA D, ZHOU Z, YU X, *et al.* Reliability analysis of multi-state Bayesian networks based on fuzzy probability [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(12):2607-2611. (马德仲, 周真, 于晓洋, 等. 基于模糊概率的多状态贝叶斯网络可靠性分析[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(12):2607-2611.)
- [14] NILSSON N. Artificial intelligence[M]. ZHENG K, ZHUANG Y, translated. Beijing: China Machine Press, 2000:203-205. (NILSSON N. 人工智能[M]. 郑邦根, 庄越挺, 译. 北京: 机械工业出版社, 2000:203-205.)
- [15] LIU J, YANG J, WANG J, *et al.* Engineering system safety analysis and synthesis using the fuzzy rule-based evidential reasoning approach [J]. *Quality and Reliability Engineering International*, 2005, 21(4):387-411.
- [16] YANG J, LIU J, WANG J, *et al.* Belief rule-base inference methodology using the evidential reasoning approach-RIMER[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, 2006, 36(2):266-285.