

# 基于 FMEA 和模糊 Petri 网推理的 装备保障过程诊断研究

孙宝琛<sup>a</sup>, 贾希胜<sup>b</sup>, 程中华<sup>a</sup>

(军械工程学院 a. 装备指挥与管理系; b. 训练部, 石家庄 050003)

**摘要:** 为满足装备保障过程分析、瓶颈优化的需要, 提出基于失效模式影响分析(FMEA)和模糊 Petri 网推理的装备保障过程诊断方法, 通过 FMEA 建立装备保障过程诊断的因果图, 由因果图确定保障过程诊断的推理规则, 应用模糊 Petri 网建立智能的、利于计算机编程实现的保障过程诊断的过程模型。通过研究发现, 基于 FMEA 的规则形成方法便于知识、经验向规则的准确转换提取, 模糊 Petri 网的方法利于将推理过程形式化, 实现推理的自动化, 提高过程诊断的效率。研究的过程诊断模型和方法已在集群装备保障过程优化决策系统实现中取得较好的效果。

**关键词:** 故障模式与影响分析; 模糊 Petri 网; 规则推理; 过程诊断

**中图分类号:** G306 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)08-2973-05

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.044

## Study on diagnosis model for support process based on FMEA and fuzzy reasoning Petri nets

SUN Bao-chen<sup>a</sup>, JIA Xi-sheng<sup>b</sup>, CHENG Zhong-hua<sup>a</sup>

(a. Dept. of Equipment Command & Management, b. Training Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** To satisfy the requirement of the support process analysis and optimization, this article presented the method of diagnosis for support process based on failure modes and effect analysis (FMEA) and fuzzy Petri net. The method could make the cause and effect diagram by FMEA, which could abstract the rule-based reasoning and make diagnosis and reasoning model with fuzzy Petri net. The model is intelligent and easy to realize by computer program. The method based on FMEA is convenient for the knowledge and experience translation to rules. The fuzzy Petri net is convenient for the reasoning formalization and automatization. The method and model are applied in the support process optimization and decision system and elicit good effects.

**Key words:** failure modes and effect analysis; fuzzy Petri nets; rule-based reasoning; diagnosis model

## 0 引言

装备保障过程设计是过程管理的必要环节, 包括过程建模、评价、分析、优化等阶段。过程的分析是在得到过程效率评价结果后, 对过程进行的诊断, 主要是对过程中存在的潜在瓶颈的位置、模式、原因及影响进行推理、判断和分析, 进而为过程的优化决策提供方向。目前, 实践中对于装备保障过程诊断的方法多是人为判断的方式, 主观因素明显, 不便于定量分析, 同时过程诊断中的逻辑判断关系不便于描述, 增加了过程管理系统开发的难度。利用 FMEA 方法可以准确分析过程的瓶颈点, 同时具有很强的逻辑推理性。文献[1~3]将 FMEA 引入企业生产的过程管理中, 对过程诊断分析的原理和方法进行了阐述, 通过对优序数排序来确定过程中的瓶颈点, 从而提出改进措施, 对装备保障过程诊断具有一定的借鉴作用。但是, 这些方法中没有充分利用 FMEA 中的有效信息, 对于分析中的规则没有进行提取, 也没有给出推理计算的算法, 不便于装备

保障过程管理系统诊断知识库的建立, 过程诊断难以实施。推理规则常常是根据人的经验和不确定信息确定的, 因此带有一定的模糊性。文献[4,5]分析了模糊 Petri 网的规则推理的原理和方法, 文献[6~9]研究了基于模糊 Petri 网推理方法的决策和评价应用, 提供了推理计算的算法, 但这些研究对于规则的来源没作具体说明, 仅应用 Petri 网建立推理的过程模型来描述推理的逻辑结构, 并对推理计算的算法进行了探讨, 而对采用 FMEA 方法提取诊断推理规则、结合模糊 Petri 网建立推理过程计算推理结果的研究鲜有见到。

本文基于以上考虑, 采用 FMEA 的逻辑分析思路构建过程诊断的推理规则, 对装备保障的决策过程进行诊断研究, 在获得推理规则后, 结合模糊 Petri 网建立推理模型并进行推理计算, 得到最终的装备保障过程诊断结果。运用 FMEA 方法便于装备保障过程中专家和决策人员经验知识向过程诊断规则的转换, 以形成过程诊断的知识库和模型库, 同时运用模糊 Petri 网的推理方法可使推理过程形式化, 进而为装备保障过

收稿日期: 2011-12-07; 修回日期: 2012-01-12

作者简介: 孙宝琛(1980-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为装备保障仿真理论与应用(baochensun@163.com); 贾希胜(1964-), 男, 河北衡水人, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为装备保障仿真理论与应用; 程中华(1972-), 男, 河南驻马店人, 副教授, 博士, 主要研究方向为装备保障仿真理论与应用。

程管理中过程诊断系统的开发提供模型和算法。

### 1 FMEA 过程分析原理

FMEA 是一种系统化的工作技术和模式化的思考形式<sup>[10]</sup>,其系统化的思想实质上蕴涵着持续质量改进的管理流程思想,只不过传统上 FMEA 是作为一项可靠性工程技术分析工具而没有作为一种管理工具使用。在过程管理中,FMEA 方法可作为一项用于确定和识别系统在设计、运行中已知和潜在问题及瓶颈的工程技术。通过分析每一个潜在的问题模式,确定其产生的影响程度,从而识别系统设计、运行中的薄弱环节和关键项目,为制定改进控制措施提供依据。其基本原理如图 1 所示<sup>[11]</sup>,根据现有的资料 and 任务需求,分析过程中每一个潜在的故障模式,分析引起故障的原因,建立一份完整的故障模式分析表格,利用统计方法估算故障发生时的严重度  $S$ 、发生度  $O$  及难检度  $D$  等因素,而后计算风险优序数 (risk priority number, RPN) 的值,根据 RPN 值的大小判断故障的影响程度,以确定改进的措施<sup>[12]</sup>。其中,  $S$  为潜在故障模式发生时对下一活动、子系统、系统或任务影响后果严重程度的评价指标,仅用于故障的后果,要减少故障后果的严重度级别,只能通过修改设计来实现。故障一般分为灾难、致命、临界、轻度等等级,取值在 0.1 ~ 1.0。  $O$  为某一特定故障起因或机理出现的可能性,一般可分为极高、高、中等、低等等级,取值在 0.1 ~ 1.0。  $D$  为发现故障原因的难易程度,是探测故障模式、原因、机理的能力指标,一般分为极难、难、可能、能等等级,取值在 1 ~ 10。

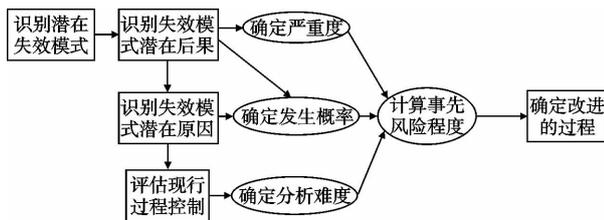


图1 基于FMEA的过程诊断原理

根据过程诊断中 FMEA 设计的一般原理,结合保障过程的特点,设计保障过程的 FMEA 表格,如表 1 所示。该 FMEA 表格中涵盖了任务功能、问题模式、问题后果、问题起因、过程控制措施等九项要素。以装备保障决策层次过程为例,本文建立了该层次过程的 FMEA 分析表 5,并结合该表对每项要素进行了简要说明。

表 1 装备保障过程 FMEA 表格设计

要素项									措施及可能结果			
任务功能	问题模式	问题后果	严重程度	问题起因	发生概率	分析难度	风险顺序	过程控制	$S$	$O$	$D$	风险顺序

a) 问题模式。通过综合分析装备保障运行过程,以及保障人员、设备工具、器材备件、运输保障等因素,列出保障过程中出现问题的方式,并根据故障树的逻辑原理构建问题过程故障树。以决策层次过程为例,主要问题模式列于表 5 中。

b) 问题后果。它是指潜在的失效模式失效后产生的后果。决策层次的过程中问题后果列于表 5 中。

c) 严重程度。保障效率是保障任务顺利完成的保证,在保障过程出现问题后,其严重程度根据问题对保障效率的影响程度进行划分,并制定严重度  $S$  的评定准则,如表 2 所示。对于严重度的取值可以在作战前根据以往作战保障经验由保障

的指挥员、工程技术人员集体决策确定。

表 2 严重度  $S$  的评定准则

评定准则	严重等级	严重度
该类问题导致保障系统过程停止	灾难	0.9 ~ 1.0
该类问题导致保障系统过程效率低下	致命	0.7 ~ 0.8
该类问题导致保障系统过程效率比较低	临界	0.5 ~ 0.6
该类问题导致保障系统过程效率不高	轻度	0.1 ~ 0.4

d) 问题起因。指导致问题模式的多种原因,对于保障决策层次,问题模式的发生原因已列于表 5 中。

e) 发生概率。根据决策者和专家的战时保障经验,将过程问题分为非常高、高、中等、低、极低五个等级,并制定各类问题发生的概率以及评价的准则,如表 3 所示。

表 3 发生概率  $O$  的评定准则

评定准则	失效等级	发生率
出现问题是不可避免的	非常高	0.9 ~ 1.0
问题反复发生	高	0.7 ~ 0.8
偶尔有问题发生	中等	0.5 ~ 0.6
很少发生问题	低	0.3 ~ 0.4
基本没问题发生	极低	0.1 ~ 0.2

f) 过程控制。针对保障中决策过程的每一类问题模式采取的有效监控方法以及相应的补救措施,一般的过程监控是通过过程的管理系统对保障过程的相关数据进行实施收集、统计分析实现的,采取的补救措施多是人为主观经验的判断。

g) 分析难度。作为战时保障过程,多数需要专家进行分析、计算和推断其复杂性,需要时间长,这也成为过程问题发现、改进的难点之一。根据决策者和专家的经验及以往的数据记录,确定问题难以分析程度的评定准则、等级和数值归纳,如表 4 所示。

表 4 分析难度  $D$  评定准则

评定准则	分析等级	分析难度
很难分析出问题	非常高	9 ~ 10
较难分析出问题	高	7 ~ 8
基本可以分析出问题	中等	5 ~ 6
可以分析出问题	低	1 ~ 4

h) 风险顺序数。通过对问题失效模式严重程度、发生概率、分析难度的评估,根据公式:风险数 = 严重程度 × 发生概率 × 分析难度,计算风险顺序数,确定保障过程在效率方面面临的主要问题。

i) 控制效果评价。通过实施过程控制措施,降低问题发生的频率,可以降低风险度,同时也可以改变过程条件,降低过程分析的难度,达到降低问题风险度的目标。因此,在 FMEA 中,需要对实施过程控制措施和改变过程条件后的风险顺序数进行重新评价。

### 2 基于 FMEA 的装备保障过程诊断推理规则确定

根据第 1 章的问题模式分析,结合装备保障决策层次过程 FMEA 表格,建立过程诊断变量和问题的因果关系,如图 2 所示。该图的底层为基本原因,由此向上依次是由下层原因导致的结果,这种因果嵌套形成的因果图可以作为诊断推理的基本逻辑关系。

借助人智能模糊规则推理的知识,根据保障决策层过程诊断因果图可以建立一些基本的推理规则,为了讨论的方便,先给出模糊规则知识表示的一些定义。

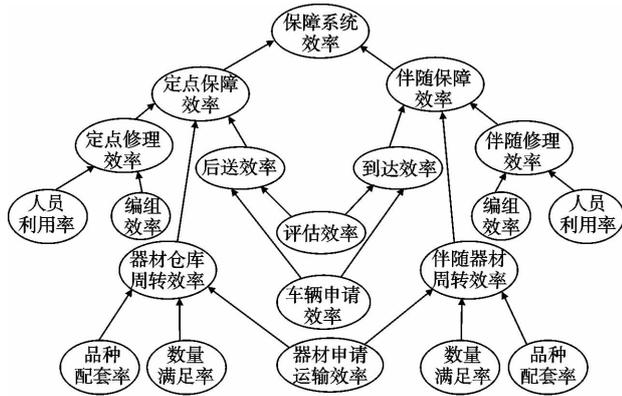


图2 过程诊断变量关系因果图

令  $R$  是模糊产生式规则集,  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ 。对于其中每个规则  $R_i$  的定义为: if  $d_j$  then  $d_k (CF = \mu_i)$ , 其中  $d_j$  和  $d_k$  为命题, 它们的真值是介于 0 和 1 之间的实数;  $\mu_i$  为规则的模糊因子 (certainty factor, CF),  $\mu_i \in [0, 1]$ 。不难看出,  $\mu_i$  越接近 1, 规则  $R_i$  越可信。通常模糊规则根据命题间的关系不同, 可简单地表述为下面三种类型:

- a)  $R_i$  if  $d_j$  then  $d_k (CF = \mu_i)$ ;
- b)  $R_i$  if  $d_{i1}$  or  $d_{i2}$  then  $d_k (CF = \mu_i)$ ;
- c)  $R_i$  if  $d_i$  and  $d_j$  then  $d_k (CF = \mu_i)$ 。

根据模糊规则推理定义, 结合 FMEA 分析表格和因果图, 得到装备保障决策层次过程诊断的推理规则如下:

- $R_1$  if  $d_1$  then  $d_6 (CF = \mu_1)$  ;  $R_2$  if  $d_2$  then  $d_6 (CF = \mu_2)$  ;
- $R_3$  if  $d_3$  then  $d_6 (CF = \mu_3)$  ;  $R_4$  if  $d_3$  then  $d_7 (CF = \mu_4)$  ;
- $R_5$  if  $d_4$  then  $d_7 (CF = \mu_5)$  ;  $R_6$  if  $d_5$  then  $d_7 (CF = \mu_6)$  ;
- $R_7$  if  $d_6$  then  $d_8 (CF = \mu_7)$  ;  $R_8$  if  $d_7$  then  $d_9 (CF = \mu_8)$  ;
- $R_9$  if  $d_{10}$  then  $d_8 (CF = \mu_{15})$  ;  $R_{10}$  if  $d_{12}$  then  $d_8 (CF = \mu_9)$  ;
- $R_{11}$  if  $d_{13}$  then  $d_{12} (CF = \mu_{10})$  ;  $R_{12}$  if  $d_{14}$  then  $d_{12} (CF = \mu_{11})$  ;
- $R_{13}$  if  $d_{16}$  then  $d_{15} (CF = \mu_{13})$  ;  $R_{14}$  if  $d_{17}$  then  $d_{15} (CF = \mu_{14})$  ;
- $R_{15}$  if  $d_{15}$  then  $d_9 (CF = \mu_{12})$  ;  $R_{16}$  if  $d_{11}$  then  $d_9 (CF = \mu_{16})$  ;
- $R_{17}$  if  $d_{18}$  then  $d_{10} (CF = \mu_{19})$  ;  $R_{18}$  if  $d_{18}$  then  $d_{11} (CF = \mu_{20})$  ;
- $R_{19}$  if  $d_{19}$  then  $d_{10} (CF = \mu_{17})$  ;  $R_{20}$  if  $d_{19}$  then  $d_{11} (CF = \mu_{18})$  ;
- $R_{21}$  if  $d_8$  and  $d_9$  then  $d_{20} (CF = \mu_{21})$ 。

命题条件含义及发生概率如表 6 所示, 模糊因子如表 7 所示。

表 5 装备保障决策层次过程 FMEA 表格

任务功能	问题模式	问题后果	要素项					控制结果				
			严重程度	问题起因	发生概率	分析难度	风险顺序	过程控制	严重程度	发生概率	分析难度	风险顺序
规定时间内完成一定数量的装备保障任务, 保证系统的保障效率维持在一定水平	装备战损评估效率低	不能及时确定维修级别, 后续工作无法开展	0.8	评估设备陈旧, 评估人员少、技术差	0.6	5	2.4	加强技术力量	0.8	0.3	6	1.44
	车辆申请时间过长	损坏装备等待运送时间过长, 影响抢修进程	0.5	协调机制不好, 手续复杂	0.5	8	2.0	建立机制, 简化申请手续	0.5	0.4	7	1.40
	运输车辆不足	部分损坏装备等待时间过长	0.6	运输车辆过少, 战前预计不足	0.4	2	0.48	分级加强运输车辆配备	0.6	0.2	2	0.24
	损坏装备没有及时到达	无法展开抢修, 占用运输资源	0.9	缺少导航或途中遭受打击	0.6	8	4.32	加强通信指挥、定位和防护手段	0.9	0.4	5	1.8
	修理人员配备不足	损坏装备等待, 修理任务积压, 不能按时完成	0.7	伤亡或战前预计不足, 配置不合理	0.7	6	2.94	充分预计, 加强防护, 减少损伤	0.7	0.6	5	2.1
	装备修理时间长	修理工作进展缓慢, 系统效率低下	0.5	人员技术水平低, 资源配置不合理	0.8	4	1.60	提高修理人员技术, 优化配置	0.5	0.5	4	1.0
	修理人员利用时间过长	导致人员利用率过高, 任务积压	0.8	缺少设备、器材或人员编组不合理	0.6	7	3.36	调控器材设备、调度使用人员	0.8	0.4	6	1.92
	修理设备占用时间过长	待修装备等待, 修理时间过长	0.7	设备使用不当或配置、调度不合理	0.3	4	0.84	加强技术、监控调度现有设备	0.7	0.3	3	0.63
	修理设备配置过少	修理人员、损坏装备等待	0.7	预计不足, 同类设备配置过少	0.5	6	2.1	加强配备, 提高通用性	0.7	0.4	6	1.68
	备件申请时间过长	修理不及时, 影响人员、设备效率	0.6	程序繁琐, 通信不畅	0.6	5	1.80	简化手续, 提高通联水平	0.6	0.4	4	0.96
	备件运输时间过长	影响修复时间, 占用运输资源	0.7	器材配置不合理或人员道路不熟	0.7	7	3.43	优化配置仓库组织人员熟悉道路	0.7	0.5	4	1.4
	备件品种数量符合率低	修理、供应无法开展, 任务难以完成	0.8	预计不足、消耗过快、补充不利	0.5	7	2.8	及时监控库存, 多种渠道补充	0.8	0.3	5	1.2

表 6 命题条件含义及取值

代号	含义	取值	代号	含义	取值	代号	含义	取值	代号	含义	取值
$d_1$	仓库器材品种配套率过低	0.5	$d_6$	器材仓库效率低	0.4	$d_{11}$	伴随抢修人员到达效率低	0.1	$d_{16}$	伴随抢修人员编组效率过低	0.7
$d_2$	仓库器材数量满足率过低	0.5	$d_7$	伴随器材效率低	0.4	$d_{12}$	定点抢修效率低	0.3	$d_{17}$	伴随抢修人员利用率高	0.9
$d_3$	仓库器材申请供应效率过低	0.6	$d_8$	定点保障效率低	0.3	$d_{13}$	定点抢修人员编组效率过低	0.8	$d_{18}$	战损评估效率低	0.4
$d_4$	伴随器材数量满足率过低	0.5	$d_9$	伴随保障效率低	0.2	$d_{14}$	定点抢修人员利用率高	0.6	$d_{19}$	运输车辆申请保障效率低	0.6
$d_5$	伴随器材品种配套率过低	0.5	$d_{10}$	战损装备后送运输效率低	0.6	$d_{15}$	伴随抢修效率低	0.7	$d_{20}$	决策层次保障过程效率低	0.9

表 7 规则的模糊因子

CF	取值	CF	取值	CF	取值	CF	取值
$\mu_1$	0.8	$\mu_6$	0.8	$\mu_{11}$	0.5	$\mu_{16}$	0.9
$\mu_2$	0.7	$\mu_7$	0.4	$\mu_{12}$	0.9	$\mu_{17}$	0.7
$\mu_3$	0.6	$\mu_8$	0.6	$\mu_{13}$	0.3	$\mu_{18}$	0.2
$\mu_4$	0.6	$\mu_9$	0.5	$\mu_{14}$	0.7	$\mu_{19}$	0.8
$\mu_5$	0.7	$\mu_{10}$	0.4	$\mu_{15}$	0.9	$\mu_{20}$	0.8
						$\mu_{21}$	0.9

### 3 基于模糊 Petri 网的装备保障过程诊断推理

用以上的推理规则构建模糊 Petri 网模型后进行推理计算。首先给出基于推理规则的模糊 Petri 网的定义<sup>[4]</sup>：

设六元组  $(P, T, I, O, \tau(t), S_0(p))$  代表模糊 Petri 网, 其中:  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  是模糊库所节点的有限集合, 表示模糊命题;  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  是模糊变迁节点的有限集合, 表示规则的实现;  $I$  是定义在  $P \times T$  上的一个带标志的模糊关系, 表示库所节点到变迁节点的连接情况和每一个连接的权系数, 满足  $0 < I(p_i, t_j) \leq 1$ ;  $O$  是定义在  $T \times P$  上的一个带标志的模糊关系, 表示变迁节点到库所节点的连接情况和每个输出连接的可信度,  $0 < O(t_j, p_i) \leq 1$ ;  $\tau(t)$  是定义在变迁集合  $T$  上的一个取值于  $[0, 1]$  中实数的函数, 表示变迁节点的触发阈值;  $S_0(p)$  是定义在库所集合  $P$  上的一个取值于  $[0, 1]$  中实数的函数, 表示库所节点在推理开始时的初始标记状态, 即已知命题的可信度为 1, 未知命题的可信度定义为 0。

与普通的 Petri 网相比, 基于规则的模糊 Petri 网有以下特点, 这些特点决定了该方法比较适合用于推理过程:

a) 变迁能否触发, 即规则能否实现, 取决于库所中的模糊托肯值、各输入库所权重以及变迁的阈值。作为一个特例, 某一变迁的几个输入库所中, 即使存在模糊托肯值为 0 的库所, 只要其他库所的托肯值和权系数足够大, 变迁照样可以触发, 这一点在普通 Petri 网中是不能实现的。

b) 变迁的触发并不会引起输入库所中模糊托肯值的变化, 这一特点是基于事实依据, 推理的进行并不改变初始给定的事实。

c) 由于事实不会因为规则的成立而消失, 所以同一个条件可同时用于不同的推理规则中, 反映在模糊 Petri 网中, 即同一模糊库所可同时触发多个变迁, 不存在传统 Petri 网中的冲突。

d) 多个变迁可以有相同的输出库所, 在推理当中表现为多个规则可以得到同一结论。此时, 结论的可信度根据不同情况有多种计算方法, 一般采用取极大值的方法, 即结论的可信度为所有可得到同一结论的可信度的最大值。

根据模糊 Petri 网定义及特点, 结合图 2 和 FMEA 表格, 可以将装备保障决策层次过程诊断推理过程转换为模糊 Petri 网模型图, 如图 3 所示。

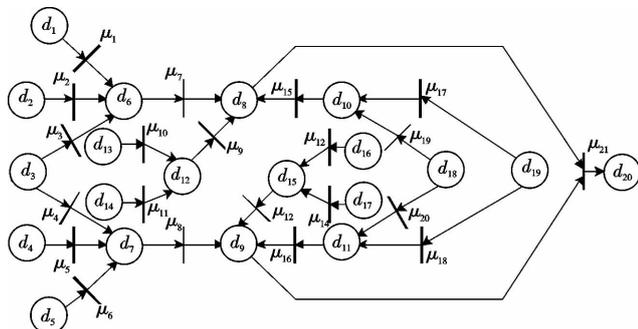


图 3 装备保障决策层次过程诊断推理模糊 Petri 网

对于模糊 Petri 网的推理算法, 基于以上模糊 Petri 网的定义和特点可以定义如下, 为了分析和说明的方便, 给出模糊 Petri 网的矩阵形式:

a)  $\Delta = \{\delta_{ij}\}$  为输入矩阵,  $\delta_{ij} \in [0, 1]$  表示  $P_i$  到  $T_j$  上的输入关系和权重。当  $P_i$  是  $T_j$  的输入时,  $\delta_{ij}$  等于  $P_i$  到  $T_j$  输入弧上的权系数  $\alpha_{ij}$ ; 当  $P_i$  不是  $T_j$  的输入时,  $\delta_{ij} = 0$ , 其中:  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ 。

b)  $\Gamma = \{\gamma_{ij}\}$  为输出矩阵,  $\gamma_{ij} \in [0, 1]$  表示  $T_j$  到  $P_i$  上的输出关系和结论的可信度。当  $P_i$  是  $T_j$  的输出时,  $\gamma_{ij}$  等于变迁  $T_j$  推出结论  $P_i$  的可信度  $\beta_{ij}$ ; 当  $P_i$  不是  $T_j$  的输出时,  $\gamma_{ij} = 0$ , 其中:  $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ 。

c)  $S = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T$  为定义在模糊库所集上的状态向量, 表示各命题的可信度,  $s_i \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, n, s_0 = [s_{10}, s_{20}, \dots, s_{n0}]^T$  表示命题的初始可信度。

d)  $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m]^T$  为变迁的阈值向量,  $\tau_j \in [0, 1], j = 1, 2, \dots, m$ 。

设某个推理过程中有  $n$  个命题,  $m$  个推理规则, 表现在模糊 Petri 网模型中则有  $n$  个库所和  $m$  个变迁, 输入矩阵  $\Delta_{n \times m}$ 、输出矩阵  $\Gamma_{n \times m}$ 、变迁的阈值向量  $\tau$  和状态向量  $S$  参照模糊 Petri 网矩阵形式定义给出。根据推理算法的需要, 定义三个算子<sup>[7,8]</sup>:

设  $X, Y, Z$  为  $n \times m$  维矩阵, 则

加法算子  $\oplus: X \oplus Y = Z, z_{ij} = \max(x_{ij}, y_{ij})$ ;

直乘算子  $\odot: X \odot Y = Z, z_{ij} = x_{ij} \times y_{ij}$ ;

比较算子  $\ominus: X \ominus Y = Z, z_{ij} = 1$  if  $x_{ij} \geq y_{ij}; z_{ij} = 0$  if  $x_{ij} < y_{ij}$ 。

由此, 推理过程分解为七步进行:

a) 计算等效模糊输入可信度  $E = \Delta^T \cdot S_0$ , 其中:  $E = [e_1, e_2, \dots, e_m]^T$ , 这一步是将同一变迁中多个模糊输入按照它们的可信度和权系数等效为一个权系数为 1 的模糊输入。

b) 计算等效模糊输入可信度与变迁阈值的比较  $G = E \ominus \tau$ 。

c) 剔除等效模糊输入中可信度小于变迁阈值的输入项, 即计算  $H = E \odot G$ , 经过这一步计算后,  $H$  中只包含可使变迁触发的等效模糊输入的可信度。

d) 计算模糊输出库所的可信度,  $S^1 = \Gamma \cdot H$ , 其中:  $S^1$  为  $m$  维列向量, 表示经过第一轮推理后, 可以直接得到的结论命题的可信度。在  $S^1$  中, 不能直接推理得到不是结论命题的库所, 可信度为零。

e) 计算当前可得到的所有命题的可信度  $S_1 = S_0 \oplus S^1$ 。

f) 用步骤 e) 中的  $S_1$  代替步骤 a) 中的  $S_0$ , 反复进行步骤 a) ~ e) 的迭代。设  $S_k$  为第  $k$  步推理得到的结论, 则在第  $k$  步推理进行后, 所有命题的可信度为  $S_k = S_{k-1} \oplus S^k$ 。

g) 当推理计算不再使任何命题的可信度发生变化时, 即  $S_k = S_{k-1}$  时, 推理结束。

将推导过程归纳为一个算式, 可得  $S_k = S_{k-1} \oplus \Gamma \cdot H = S_{k-1} \oplus \Gamma (E \odot G) = S_{k-1} \oplus \Gamma (E \odot (E \ominus \tau)) = S_{k-1} \oplus \Gamma ((\Delta^T \cdot S_{k-1}) \odot ((\Delta^T \cdot S_{k-1}) \ominus \tau))$ , 该式为模糊 Petri 网用于推理过程的完整推导算式。

根据以上推理方法和步骤, 以装备保障决策层次过程为例进行推理诊断。由上文的推理知识结合模糊 Petri 网定义, 在模糊 Petri 网模型图中, 库所  $P_i$  中的  $d_i$  代表了推理的命题条件, 变迁  $T_i$  中的  $\mu_i$  代表了推理命题的实现, 根据模糊 Petri 网推理步骤, 首先确定模糊 Petri 网的输入矩阵和输出矩阵。根



---

(上接第 2977 页)

- [8] 伊洪冰,张春润,刘增勇,等. 模糊 Petri 网在装备保障指挥决策中的应用研究[J]. 指挥控制与仿真,2008,30(8):99-102.
- [9] 王少君,王刚,吕民,等. 面向 ERP 实施过程的模糊 Petri 网评价模型[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(9):1374-1378.
- [10] 李晓萍,韩之俊. FMEA 下的超市食品 HACCP 计划制定与实现

[J]. 工业工程,2009,12(4):106-109.

- [11] 门峰,刘子先. 基于 CBR 和 FMEA 知识模型的产品保证成本预测方法研究[J]. 设计与研究,2009(2):8-10.
- [12] 宋立夫. ERP 实施方法体系及诊断模型研究[D]. 天津:天津大学,2006.