

基于模糊 Petri 网推理的 核动力装置专家系统研究

彭 俏, 郭立峰, 马 杰

(海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

摘要:随着核动力装置专家系统知识库的增大, 知识库的一致性检验变得困难, 系统的诊断推理效率也随之下降。为了解决这一问题, 将模糊 Petri 网用于专家系统的知识表示和推理。利用模糊 Petri 网的分析技术, 对知识库进行校验和维护, 以诊断规则的 Petri 网模型为基础, 遵照 Petri 网的运行机制进行诊断推理。仿真实验表明, 将模糊 Petri 网应用于专家系统, 可有效进行知识库一致性检验和故障诊断推理。

关键词:核动力装置; 模糊 Petri 网; 专家系统

中图分类号: TP18

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2012)S0-0356-05

Study of Nuclear Power Plant Expert System Based on Fuzzy Petri Net Reasoning

PENG Qiao, GUO Li-feng, MA Jie

(College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: With the increase of the nuclear power plant expert system knowledge base, the consistency checking of knowledge base becomes difficult, and the diagnostic reasoning efficiency of the system also decreases. To solve this problem, fuzzy Petri net was used in knowledge representation and reasoning of the expert system. Fuzzy Petri net analysis techniques was used in calibration and maintenance of the knowledge base, and the diagnostic reasoning was carried out based on diagnostic rules and operating mechanism of Petri net. Simulation results show that the fuzzy Petri net is used in expert system, expert system can effectively carry out the knowledge base consistency test and fault diagnostic reasoning.

Key words: nuclear power plant; fuzzy Petri net; expert system

核动力装置是一技术密集、结构复杂、造价昂贵的复杂系统, 一旦出现故障, 其后果不堪设想。为了提高核动力装置运行的安全性、可靠

性, 开发 1 套核动力装置故障诊断系统具有非常重要的实际意义。随着计算机技术的发展, 专家系统作为人工智能中最为活跃的一个分

支,在核动力装置故障诊断中得到了广泛应用。专家系统能够有效地处理产生式规则和利用专家的经验,对诊断结果有较好的解释能力,但为使专家系统具有较好的诊断能力,需要较多的规则进行处理。随着知识的不断获取,知识库不断增大,知识单元之间的相互影响和相互联系也随之变得复杂。这时,知识库的一致性和逻辑错误检查显得尤为重要。且规则数的增多也导致系统推理速度下降,不利于系统实时诊断^[1-2]。

模糊 Petri 网是基于模糊产生式规则的知识库系统的良好建模工具。将模糊 Petri 网与专家系统结合,利用模糊 Petri 网的图形描述能力,将专家系统的模糊规则映射成结构化的知识表达,使得知识的表示简单、清晰,同时又具有模糊系统的模糊推理能力,为专家系统知识库一致性检查和故障诊断推理提供一种有效的方法。

1 基于模糊 Petri 网的知识表示

模糊 Petri 网由库所和变迁组成,它将模糊产生式规则中的前提和结论均作为一种库所,而前提与结论间的关系看作一种变迁。模糊 Petri 网是基于模糊产生式规则的知识库系统良好的建模工具,它既结合了 Petri 网描述异步并发和图形表示的能力,使得知识的表示简单、清晰,同时又具有模糊推理能力,便于知识的分析、推理、测试及决策支持。

模糊 Petri 网可定义为 1 个八元组 $FPN = (P, T, D, I, O, f, \alpha, \beta)$ 。其中: P 为库所节点的有限集合; T 为变迁节点的有限集合; D 为命题的有限集合; I 为输入函数,反映库所到变迁的映射; O 为输出函数,反映变迁到库所的映射; f 为一关联函数,它是从变迁到 $[0, 1]$ 之间的实数值映射; α 为一关联函数,它是从库所到 $[0, 1]$ 之间的实数值映射; β 为一关联函数,是从库所到命题之间的一一映射^[2]。

模糊产生式规则有如下 3 种形式,其对应的模糊 Petri 网模型示于图 1。

形式 1:

if d_i then d_k ($CF = u_i$) 即 $d_i \rightarrow d_k$

形式 2:

if d_i and d_j then d_k ($CF = u_i$) 即 $d_i \cap d_j \rightarrow d_k$

形式 3:

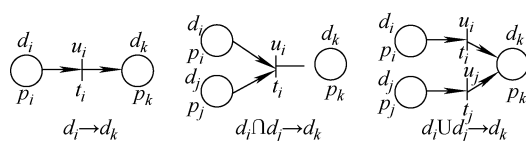


图 1 模糊产生式规则的 Petri 网模型

Fig. 1 Petri net models of fuzzy production rules

if d_i or d_j then d_k ($CF = u_i$) 即 $d_i \cup d_j \rightarrow d_k$

图 1 中, $d_i = \beta(p_i)$, $d_j = \beta(p_j)$, $d_k = \beta(p_k)$, d_i 和 d_j 为 1 组前提或状态, d_k 为若干个动作或结论; $u_i = f(t_i)$, $u_j = f(t_j)$ 分别为变迁 t_i , t_j 的置信度 CF 值。

以上 3 种模糊 Petri 网模型中,结论库所置信度 $\alpha(p_k)$ 的计算方法分别为:

$$\alpha(p_k) = \alpha(p_i) \times u_i \quad (1)$$

$$\alpha(p_k) = \min(\alpha(p_i), \alpha(p_j)) \times u_i \quad (2)$$

$$\alpha(p_k) = \max(\alpha(p_i) \times u_i, \alpha(p_j) \times u_i) \quad (3)$$

其中: p_i , p_j 为前提库所; p_k 为结论库所; $\alpha(p_i)$, $\alpha(p_j)$ 分别为前提库所的可信度; $\alpha(p_k)$ 为结论库所置信度。

2 基于模糊 Petri 网的核动力装置专家系统设计

2.1 核动力装置专家系统结构

故障诊断专家系统是人工智能在设备故障诊断中的应用,它模拟人类专家解决特定问题的方法,运用了观察、计算、判断、推理及选择等一系列思维方式进行智能诊断。基于 Petri 网推理的核动力装置专家系统结构示于图 2。

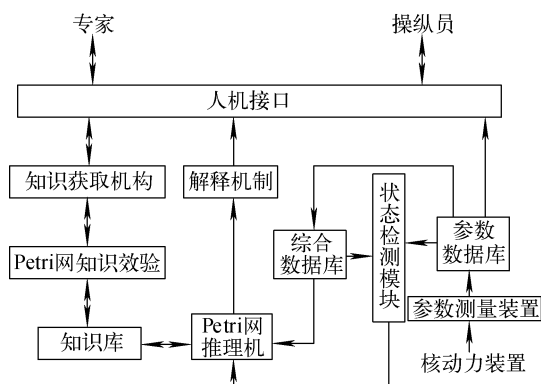


图 2 核动力装置专家系统的结构

Fig. 2 Structure of nuclear power plant expert system

2.2 基于模糊 Petri 网的知识库一致性检查

对于传统的基于产生式规则的知识库维护,通常涉及以下几个方面:规则的冲突、冲撞、循环、死路等,知识库的一致性维护就是找出并修复上述可能的缺陷。由于基于规则的知识库中规则间较为独立,反映不出规则间的依赖关系,这给知识库的校验带来困难。基于模糊 Petri 网的知识表示,其结构清晰、参数意义明确,是进行知识库的一致性检验的有效方法。

基于模糊 Petri 网的专家系统知识库一致性校验算法包括循环规则、死路规则、冗余规则和矛盾规则的校验,算法的基本步骤^[3-4]如下。

1) 初始化模糊 Petri 网模型,输入各初始库所和变迁的置信度等。

2) 启动校验程序,运行每条可激发变迁,直到无变迁可激发。在运行过程中,如果 1 个库所是其自身的可达集,则模糊 Petri 网模型中含有循环规则。

3) 在某个变迁发生后,如果没有生成新的标识,则存在冗余规则。

4) 在某标识下, P 和 $\text{NOT}(P)$ 同时存在标识,则存在矛盾规则。

5) 在模糊 Petri 网运行结束后,如果变迁集中存在未激发的变迁,则在模糊 Petri 网模型中含有死路规则。

2.3 基于模糊 Petri 网的故障诊断推理

1 个系统故障的因果关系是模糊的,用模糊 Petri 网的知识表示方法来描述有关故障症状与原因之间的模糊关系,具有逻辑结构清晰、推理方便等优点。从 Petri 网角度看,1 个系统包括两部分:变迁和条件。变迁代表系统中发生的事件或行为;变迁的发生受条件的控制。某个变迁一旦被激活,就确定一些后验条件,使系统的诊断过程处于动态过程。在变迁的激活过程中,如果有几个变迁的激活条件同时满足,则这几个变迁同时被激活,所以 Petri 网对并发性故障系统非常适用。变迁的激活是变迁输入的位置托肯值大于系统设计的阈值 λ 。

在模糊推理算法中,需要对每一 Petri 网中的库所分别建立能达性集合、立即可达性集合和相邻库所集合。1 个库所的能达性集合 $\text{RS}(p_i)$ 是 p_i 经一系列的变迁才能达到的库所集合;1 个库所的立即可达性集合 $\text{IRS}(p_i)$ 是

p_i 经 1 次变迁 t_i 就能达到的库所集合;1 个库所的相邻库所集合 $\text{AP}(p_{ij})$ 是一系列与 p_i 经同一变迁能立即达到的库所集合。进行模糊推理时,先调用能达性集合算法和相邻库所集合算法,调用这两个算法后可得到能达性集合表和相邻库所表。

为加快推理速度,系统采用目标驱动为主的反向推理的控制策略。即选定 1 个目标库所,遍历规则库中的规则,如果存在多条路径,则按规则可信度大小依次选取这些规则。若某条规则的产生式前提条件为真,则该规则被激活,推出新的事实;否则,将该规则的前提作为子目标,递归执行上述过程,如此往复直到求出诊断结论。

故障诊断的模糊推理包括两个步骤。

1) 首先根据用户输入的现场信息,将知识库里的规则置信度按照现场经验重新计算;并按照规则置信度大小和模糊网中各位置的能达性集合表、相邻位置集合表,反向找出 1 条最可能的故障原因的路径。

2) 确定故障原因 p_i 到故障现象 p_j 间的模糊因果关系。 p_i 的置信度与用户输入的现场信息有关,从而可计算 p_j 的置信度,只要 $\alpha(p_i) > \lambda$,则认为找到故障原因,否则需另查找 1 条故障原因的路径。

3 核动力装置故障诊断实例

压力安全系统是反应堆及一回路系统的主要辅助系统之一,在反应堆及一回路系统启动、稳态功率运行、正常功率变化、停堆和故障工况下,具有压力调节和压力保护的功能,同时还具有除去反应堆冷却剂中的放射性气体的功能。

设核动力装置一回路压力安全系统在运行过程中出现系统压力下降故障,根据收集整理的资料^[5-6]建立其知识库,其中包含的推理规则列于表 1。

根据推理规则,建立压力安全系统的诊断 Petri 网模型(图 3)。定义 Petri 模型的位置库所集合如下: p_0 ,系统压力下降; p_1 ,系统泄漏; p_2 ,稳压器压力下降; p_3 ,负荷突然增加很大; p_4 ,冷却剂管道破损; p_5 ,蒸发器传热管破损; p_6 ,边界电磁阀泄漏; p_7 ,安全阀或释放阀卡开; p_8 ,稳压器电加热元件失效; p_9 ,喷雾控制阀不

表 1 压力安全系统推理规则表

Table 1 Inference rules table of pressure safety system

规则号	规则描述
R1	IF 系统泄漏 THEN 系统压力下降(CF ₁ =0.95)
R2	IF 稳压器压力下降 THEN 系统压力下降(CF ₂ =0.9)
R3	IF 负荷突然增加很大 THEN 系统压力下降(CF ₃ =0.6)
R4	IF 冷却剂管道破损 THEN 系统泄漏(CF ₄ =0.8)
R5	IF 蒸发器传热管破损 THEN 系统泄漏(CF ₅ =0.9)
R6	IF 边界电磁阀泄漏 THEN 系统泄漏(CF ₆ =0.7)
R7	IF 安全阀或释放阀卡开 THEN 稳压器压力下降(CF ₇ =0.82)
R8	IF 稳压器电加热元件失效 THEN 稳压器压力下降(CF ₈ =0.8)
R9	IF 喷雾阀控制阀不能关闭 THEN 稳压器压力下降(CF ₉ =0.88)
R10	IF 冷却剂管道破损 THEN 堆舱放射性剂量水平升高(CF ₁₀ =0.98)
R11	IF 冷却剂管道破损 THEN 堆舱舱底水位上升(CF ₁₁ =0.95)
R12	IF 蒸发器传热管破损 THEN 取样水放射性水平升高(CF ₁₂ =0.99)
R13	IF 蒸发器传热管破损 THEN 蒸发器压力升高(CF ₁₃ =0.99)
R14	IF 蒸发器传热管破损 THEN 蒸发器水位升高(CF ₁₄ =0.99)
R15	IF 安全阀或释放阀卡开 THEN 稳压器排放管温度升高(CF ₁₅ =0.99)

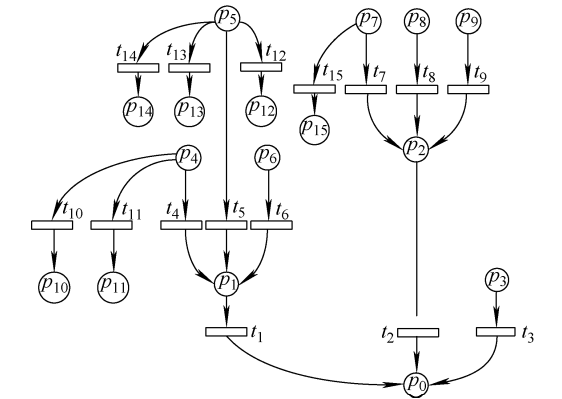


图 3 压力安全系统诊断 Petri 网模型

Fig. 3 Petri net model of pressure safety system

能关闭; p_{10} ,堆舱放射性剂量水平升高; p_{11} ,堆舱舱底水位上升; p_{12} ,取样水放射性水平升高; p_{13} ,蒸发器压力升高; p_{14} ,蒸发器水位升高;

p_{15} ,稳压器排放管温度升高。

系统 Petri 网模型建立完成后,对系统规则库进行一致性检验。排除死路规则后,系统新的 Petri 网模型示于图 4。

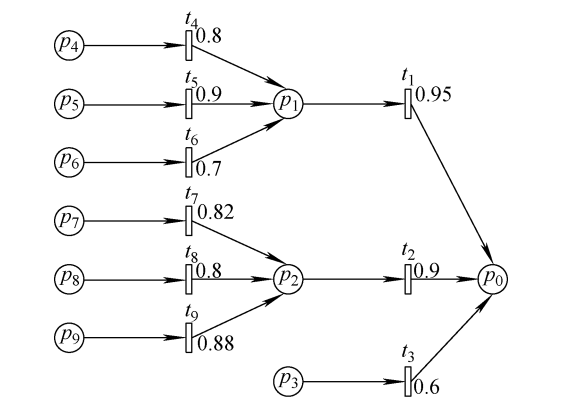


图 4 一致性检验后压力安全系统诊断 Petri 网模型

Fig. 4 Petri net model of pressure safety system after consistency test

由图 4 可知,系统的目标库所为 p_0 ,诊断推理过程为由目标库所反向推理出可导致目标库所表示故障现象的起始库所。设系统设定的阈值 λ 均为 0.7,则诊断推理具体步骤如下。

1) 由图 4 得位置库所的集合为 $P = \{p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9\}$,对 P 建立能达到性集合和相邻位置集合分别列于表 2、3。

2) 已知“系统压力下降”即故障对应的位置 p_0 ,参照表 2、3,知有 p_1 、 p_2 和 p_3 能引发 p_0 ,其中 CF_1 最大,所以就先经过位置 p_1 的路径反向推理,并在 p_1 位置作出标记,表示系统已查询路线经过此路径。

表 2 能达到性集合

Table 2 Reachable sets

p_i	IRS(p_i)	RS(p_i)
p_0	$\varnothing$	$\varnothing$
p_1	$\{p_0\}$	$\{p_0\}$
p_2	$\{p_0\}$	$\{p_0\}$
p_3	$\{p_0\}$	$\{p_0\}$
p_4	$\{p_1\}$	$\{p_1, p_0\}$
p_5	$\{p_1\}$	$\{p_1, p_0\}$
p_6	$\{p_1\}$	$\{p_1, p_0\}$
p_7	$\{p_2\}$	$\{p_2, p_0\}$
p_8	$\{p_2\}$	$\{p_2, p_0\}$
p_9	$\{p_2\}$	$\{p_2, p_0\}$

表 3 相邻位置集合
Table 3 Adjacent position sets

p_i	p_j	$AP(p_{ij})$
p_1	$\{p_0\}$	$\emptyset$
p_2	$\{p_0\}$	$\emptyset$
p_3	$\{p_0\}$	$\emptyset$
p_4	$\{p_1\}$	$\emptyset$
p_5	$\{p_1\}$	$\emptyset$
p_6	$\{p_1\}$	$\emptyset$
p_7	$\{p_2\}$	$\emptyset$
p_8	$\{p_2\}$	$\emptyset$
p_9	$\{p_2\}$	$\emptyset$

3) 引发 p_1 的路径有 $p_4 \rightarrow p_1, p_5 \rightarrow p_1, p_6 \rightarrow p_1$, 其中 CF_5 最大, 系统首先检查故障是否由该原因引发的。根据专家知识库的管理信息, 通过人机交换信息进行确定。如系统询问“蒸发器 U 型管破损”, 用户回答否, 则转步骤 4; 回答是, 则 p_5 对应的命题被激活, 根据专家经验系统给出 p_5 位置命题的可信度为 0.95。由 $\alpha(p_1) = \alpha(p_5) \times CF_5$ 计算得 $\alpha(p_1) = 0.95 \times 0.9 = 0.855$ 大于 λ , p_1 对应的命题被激活, 由 $\alpha(p_0) = \alpha(p_1) \times CF_1$ 计算得 $\alpha(p_0) = 0.855 \times 0.95 = 0.812\ 2$, 至此故障原因找到, 即由 p_5 “蒸发器传热管破损”导致的系统压力下降的可信度为 0.812 2。

4) 如果用户回答否, 则 p_5 对应的命题未被激活, 转步骤 3, 系统继续查询其它路径。

经过以上诊断实例可知, 基于模糊 Petri 网推理的专家系统不仅可很好地进行知识库一致性检验, 且其推理目的性强、易于理解、效率高, 在核动力装置故障诊断中有很好的应用前景。

4 结束语

专家系统作为一种基于知识的智能系统, 在核动力装置故障诊断中得到了广泛的应用。

但随着知识库的增大, 专家系统将面临知识校验困难和推理效率低的问题。模糊 Petri 网是基于模糊产生式规则的知识库系统良好的建模工具, 其图形表示能力使得知识的表示简单、清晰, 同时又具有模糊推理能力, 便于知识的分析、推理。将模糊 Petri 网同专家系统结合, 利用模糊 Petri 网进行知识效验和推理, 不仅为专家系统知识库效验提供了一种有效方法, 且可提高专家系统的推理效率。

模糊 Petri 网用于专家系统的诊断推理还存在需要改进的地方。在推理过程中模糊 Petri 网变迁阈值很大程度上依赖于专家经验, 难以获得精确的值, 如何利用粒子群等优化算法对模糊 Petri 网变迁阈值进行优化是下一步的研究方向。

参考文献:

[1] 方培培, 李永丽, 杨晓军. Petri 网与专家系统结合的输电网络故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(2): 26-30.
FANG Peipei, LI Yongli, YANG Xiaojun. Transmission power system fault diagnosis based on Petri nets and expert system[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2005, 17(2): 26-30 (in Chinese).

[2] 林晓琳. 基于模糊 Petri 网的专家系统实现与应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.

[3] 刘晓霞. 基于 Petri 网的知识库维护方法的研究[J]. 小型微型计算机系统, 1997, 18(7): 74-77.
LIU Xiaoxia. A study on the maintenance of a rule base using numerical Petri nets[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 1997, 18(7): 74-77 (in Chinese).

[4] 林涛. 基于模糊 Petri 网的知识推理与维护系统的设计[D]. 湖南: 长沙理工大学, 2004.

[5] 苏杰. 核动力装置运行支持数据库技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.

[6] 朱续洲. 核反应堆安全分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.