

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.06.007

改进的模糊 Petri 网算法及其在故障诊断中的应用

喻平, 曹继平, 宋建社, 章涛
(西安高技术研究所 科研部, 西安 710025)

摘要: 为解决液压系统故障诊断过程中存在的大量不确定性信息, 提出一种基于改进的模糊 Petri 网故障诊断算法。将虚库所和虚变迁引入到模糊 Petri 网算法中, 解决了变迁是否触发以及最后故障事件模糊概率值的确定问题, 使算法更符合实际和数学推理。结果证明了该改进算法的适用性和可行性。

关键词: 模糊 Petri 网; 虚库所虚变迁; 液压系统

中图分类号: TP306.3 **文献标志码:** A

Improved Fuzzy Petri Net Algorithm and Its Application in Fault Diagnosis

Yu Ping, Cao Jiping, Song Jianshe, Zhang Tao
(Dept. of Science & Technology Management, Xi'an High Technology Research Institution, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to solve the problem of plenty of uncertain information in the process of fault diagnosis of hydraulic system, propose a fuzzy Petri net in fault diagnosis algorithm. It imported the concept of false place and transition into fuzzy Petri net algorithm to solve transition trigger and last fault fuzzy probability value ensuring, so the algorithm would be better in accord with the practice and math reasoning. The result shows that this algorithm is applicable and feasible.

Keywords: fuzzy Petri net; false place and transition; hydraulic system

0 引言

液压系统具有功率大、体积小、重量轻、响应快、精度高等优点^[1], 在机械装备中发挥着重要的作用。但由于其结构复杂、元件模块多、工作环境恶劣等因素的影响, 液压系统难免出现故障。目前, 液压系统故障诊断的方法主要有基于解析模型的方法、基于信号处理的方法、基于人工智能的方法^[2]。刘泽华等^[3]将包络—灰色理论用于分析电流信号进行故障识别, 彭飞等^[4]将模糊理论用于装备液压系统故障诊断, 但这些方法只限于诊断某些部件, 不够形象直观。模糊 Petri 网是一种用网状图形表示系统建模的方法, 它以图形方式描述系统的功能关系和故障传播过程, 能根据矩阵运算进行故障诊断, 因此, 笔者采用改进的模糊 Petri 网算法对某液压系统故障进行诊断。

1 故障诊断模糊 Petri 网

笔者在模糊 Petri 网基础上, 增加了故障诊断的信息和条件限制从而形成故障诊断模糊 Petri 网。

定义 1 故障诊断模糊 Petri 网可以定义为一个八元组 (S, T, F, W, M, I, O, Y) , 其中:

$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 是模糊 Petri 网中的库所集合, 表示液压系统中能够引起故障的元器件的状态。

为便于求解, 设置 S'_i 为 S_i 的虚库所, 虚库所代表的实际意义是相同的。

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 是模糊变迁节点的有限集合, 表示液压系统中能够引起故障的事件组合, 为便于求解, 设置 T'_i 为 T_i 的虚变迁, 虚变迁代表的实际意义是相同的。

$F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$ 是网的流关系, 反映网的结构关系的信息流向, 表示液压系统的功能结构关系以及故障信息流向。

W 是网的连接弧的权函数, 其中 $W(s, t)$ 表示液压系统中每个部件的模糊故障信息对下一级的贡献度, $W(t, s)$ 表示一次变迁 (故障路径) 的规则可信度, 满足 $0 \leq W \leq 1$ 。

$M = \{M_0, M_1, \dots, M_n\}$ 是网流动过程根据变迁序列产生的标识, 表示液压系统中部件的模糊隶属度, M_{ij} 表示第 i 步变迁产生的标识集合中第 j 个库所的值。由于在故障传播过程中引起系统故障的故障元件其故障信息在流动过程中并不会随着变迁的发生而消失, 因此, 在此规定变迁的前置库所的标识 M 在发生变迁之后其值不变。

$I = \{I_j\}$ 是输入矩阵, 表示库所到变迁的权重,

收稿日期: 2011-01-18; 修回日期: 2011-03-09

作者简介: 喻平 (1987—), 男, 湖北人, 硕士, 从事军事装备保障、信息处理研究。

$$I_{ij} = W(s_i, t_j)。$$

$O = \{O_{ij}\}$ 是输出矩阵, 表示变迁到库所的规则可信度, $O_{ij} = W(t_j, s_i)。$

$Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ 是对变迁节点定义的一个阈值, 表示液压系统中一个模糊故障事件能够引起下级故障所规定的阈值。

由于在建立的故障诊断模糊 Petri 网中 $0 \leq M_i \leq 1$, 因此, 它是有界 Petri 网而且库所是安全的, 由于变迁发生之后, 其前置库所的标识不发生变化, 能克服变迁的冲突。根据系统的结构和功能建立故障诊断模糊 Petri 网, 在一定条件下变迁都能够发生, 因此网是活的。

2 模糊产生式规则以及变迁触发规则

2.1 模糊产生式规则类型

液压系统可按照结构和功能分解为多个层次的结构关系, 最后分解至不可再分的零件, 因此对应于模糊产生式规则有 3 种类型:

- 1) IF d_1 THEN d_k ;
- 2) IF d_1 AND d_2 AND \dots AND d_k THEN d_k ;
- 3) IF d_1 OR d_2 OR \dots OR d_k THEN d_k 。

3 种类型对应的 Petri 网结构见文献[5], 在参考的文献[6]由于所提出的算法仅限于类型 1 简单的网结构, 针对类型 2 和 3, 笔者引入虚变迁和虚库所的概念将网结构进行改变, 如图 1 和图 2。

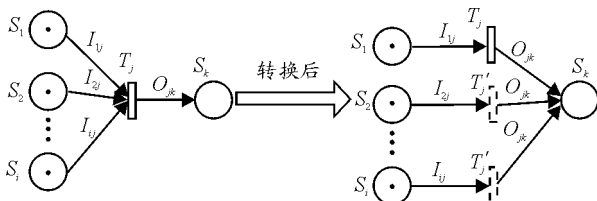


图 1 针对类型 2 的转换

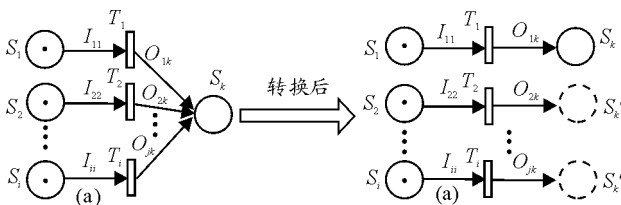


图 2 针对类型 3 的转换

2.2 变迁发生规则以及库所标识的变化

针对类型 1, 若 $M_{ni} \times I_{ij} \geq Y_j$ 则变迁有发生权,

记为 $M[T >$, 变迁后的标识为:

$$M_{n+1k} = M_{ni} \times I_{ij} \times O_{ij}, \quad M_{n+1i} = M_{ni}$$

针对类型 2, 根据 Petri 网定义所有前置库所必须有标识, 对应于此网即为: $\forall s \in S: M_{ni} \times I_{ij} \geq Y_j$ 则变迁有发生权, 记为 $M[T >$, 变迁后的标识为:

$$M_{n+1k} = \sum_{i=1}^i [M_{ni} \times I_{ij}] \times O_{ij}, \quad M_{n+1i} = M_{ni}$$

针对类型 3, 故障若要传播下去, 只需存在一个变迁发生, 即为: $\exists s \in S: M_{ni} \times I_{ij} \geq Y_j$ 则变迁有发生权, 记为 $M[T >$, 变迁后的标识为:

$$M_{n+1k} = \max M_{ni} \times I_{ij} \times O_{ij}, \quad M_{n+1i} = M_{ni}$$

3 故障诊断模糊 Petri 网的推理算法

定义 4 个算子, 设 A, B, C, D, E, F 均为 $n \times m$ 维的矩阵。

加法算子 \oplus : $C = A \oplus B \Leftrightarrow c_{ij} = \max(a_{ij}, b_{ij})$

比较算子 \cap^{\geq} : $D = A \cap^{\geq} B \Leftrightarrow d_{ij} = 1$ if $a_{ij} \geq b_{ij}$; $d_{ij} = 0$ if $a_{ij} < b_{ij}$

直乘算子 \odot : $E = A \odot B \Leftrightarrow e_{ij} = a_{ij} \times b_{ij}$

合并取最小矩阵算子 \otimes : $M \triangleq H^{\otimes}$
 $M_{ij} = \min(H_{ij}, H'_{ij}, \dots, H''_{ij})$

合并取最大矩阵算子 \ominus : $N \triangleq A^{\ominus}$
 $N_{ij} = \max(A_{ij}, A'_{ij}, \dots, A''_{ij})$

求和算子 Σ : $F = H^{\Sigma}$ $F_{ij} = \Sigma(H_{ij}, H'_{ij}, \dots, H''_{ij})$

1) 根据 Petri 网的结构若 $\bullet T_j = (S_l, S_m, \dots, S_i), \bullet T_j$ 表示变迁的输入集, 则将网结构按照图 1 的方式进行改变, 并写出输入矩阵 $I = \{I_{ij}\}$

2) 计算模糊输入可信度 $C = I^T \cdot M_0$

3) 用合并取最小矩阵算子 $D \triangleq C^{\otimes}$, 然后与变迁阈值进行比较 $E = D \cap^{\geq} Y$ 。

4) 剔除模糊输入中可信度小于变迁阈值 $F = D \odot E$, 并根据求和算子算出 $G = F^{\Sigma}$ 。

5) 根据 Petri 网的结构, 若 $\bullet S_k = (T_l, T_m, \dots, T_j)$, 则将网结构按照图 2 的方式进行改变, 并写出输入矩阵 $O = \{O_{ij}\}$, 若没有此类网结构, 则直接写出输出矩阵 $O = \{O_{ij}\}$ 。

6) 计算模糊输出库所的可信度 $M' = O \cdot G$, 若

其输出库所有与图 2 相同的结构, 则利用合并取最大矩阵算子 Θ , $M'_1 = M'^{\circ}$ 。

7) 计算出所有命题的可信度 $M_1 = M'_1 \cdot M_0$ 。

8) 用 M_1 代替 M_0 , 反复用式 (1)~式 (7) 进行迭代, 计算出 M_k , 若 $M_k = M_{k-1}$ 时, 推理结束。

4 实例分析与计算

以某液压系统顶盖回路的顶盖油缸活塞杆不能正常伸出为例来说明此算法的应用, 根据顶盖回路的结构层次画出对应的 Petri 网结构, 如图 3。

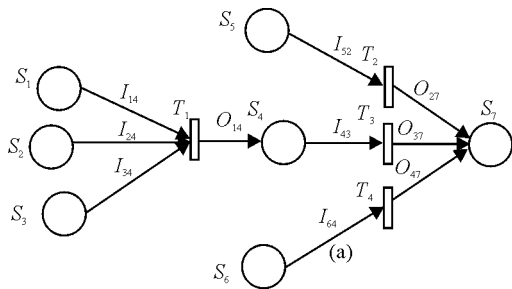


图 3 顶盖回路的 Petri 网结构

图 3 中, 各库所代表的条件以及发生的概率和变迁对应的事件描述以及阈值如表 1。

表 1 Petri 网结构对应的描述

库所/变迁	对应的描述	概率/阈值
S_1	钢球磨损或生锈	0.8
S_2	活塞划伤	0.7
S_3	弹簧损坏失效	0.8
S_4	顶盖油缸损坏	0 (初始时刻)
S_5	电磁换向阀 YV251 损坏	0.7
S_6	液控单向阀损坏	0.5
S_7	顶盖油缸活塞杆不能伸出	0 (初始时刻)
T_1	如果条件 S_1, S_2, S_3 满足则 S_4	0.2
T_2	如果条件满足 S_5 则 S_7	0.4
T_3	如果条件满足 S_4 则 S_7	0.4
T_4	如果条件满足 S_6 则 S_7	0.3

根据图 1, 先将 Petri 网进行转换图 4, 并且写出其输入矩阵和输出矩阵。

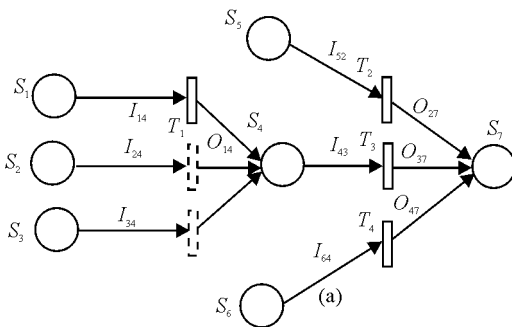


图 4 转换后的顶盖回路的 Petri 网结构

$$I = \begin{matrix} T_1 \\ T_1' \\ T_1' \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$O = \begin{matrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 \end{bmatrix}^T$$

根据算法可得变迁 T_1 能触发, 最后经过迭代可得 $M_1 = (0.8 \ 0.7 \ 0.8 \ 0.7 \ 0.7 \ 0.5 \ 0)$, 再对图 3 的 Petri 网中的变迁 T_2, T_3, T_4 按照图 2 进行转换, 然后求出 $M'_2 = (0.8 \ 0.7 \ 0.8 \ 0.7 \ 0.7 \ 0.5 \ 0.336 \ 0.392 \ 0.2)$, 最后根据推理算法求出 $M_2 = (0.8 \ 0.7 \ 0.8 \ 0.7 \ 0.5 \ 0.392)$, 进一步 $M_3 = (0.8 \ 0.7 \ 0.8 \ 0.7 \ 0.5 \ 0.392)$, 即可得出顶盖油缸活塞杆不能伸出的概率为 0.392, 从而验证算法的可行性以及实用性。

5 结束语

通过改进的模糊 Petri 网算法可以有效地解决故障诊断过程中不确定性知识的模糊推理, 通过引入虚库所和虚变迁概念解决了变迁是否触发以及最后故障事件模糊概率值的确定问题, 而且虚库所和虚变迁的引入更加符合矩阵运算规律和实际故障传播过程以及更加符合 Petri 网的定义。实例结果验证了该算法在某液压系统故障诊断中的有效性。

参考文献:

- [1] 范士娟, 杨超. 液压系统故障智能诊断技术现状与发展趋势[J]. 液压与气动, 2010(3): 22-23.
- [2] 李夏. 基于 Petri 网的故障诊断技术研究及其在液压系统中的应用[D]. 同济大学博士论文, 2006.
- [3] 刘泽华, 陆清, 谷立臣. 基于包络-灰色理论的液压系统故障诊断方法研究[J]. 液压与气动, 2008(1): 77-79.
- [4] 鹏飞, 王学智, 刘建军. 基于模糊理论的装备液压系统故障诊断研究[J]. 机械设计与制造, 2009(12): 102-104.
- [5] 包玉剑, 杨建维. 加权模糊 Petri 网在电网故障诊断中的应用[J]. 电气开关, 2010(2): 68-71.
- [6] 贾立新, 薛钧义, 茹峰. 采用模糊 Petri 网的形式化推理算法及其应用[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(12): 1264-1265.
- [7] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.