

doi: 10.7690/bgzd.2018.12.004

基于模糊概率 Petri 网的弹载二次电源故障诊断模型

赵 铮, 王光阳, 刘雨虹

(陆军沈阳军事代表局驻锦州地区军事代表室, 辽宁 锦州 121000)

摘要: 针对某型弹载二次电源的故障诊断问题, 采用模糊 Petri 网进行建模验证。在传统模糊 Petri 网的基础上, 通过引入变迁概率信息, 阐述模糊产生式规则及基于矩阵的推理运算, 并对其进行建模验证。结果表明: 模糊概率 Petri 网适用性强, 基于矩阵的推理运算清晰、高效, 易于诊断模型库的扩充、维护。

关键词: 模糊概率 Petri 网; 二次电源; 故障诊断

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Research on Fault Diagnosis of Missile Borne Secondary Power Source Based on Probability Fuzzy Petri Net

Zhao Zheng, Wang Guangyang, Liu Yuhong

(Military Representative Office of Army Military Representative Bureau in Jinzhou, Jinzhou 121000, China)

Abstract: Aiming at the problem of certain type missile borne secondary power source fault diagnosis, use fuzzy Petri net to carry out modeling verification. Based on the traditional fuzzy Petri net, by introducing the transition probability information, the rules of fuzzy production and matrix-based inference calculation are expounded and the models are validated. The results show that the fuzzy probability Petri network has strong applicability and the matrix-based inference operation is clear and efficient, which makes it is easy to diagnose the expansion and maintenance of the model base.

Keywords: fuzzy probability Petri net; secondary power source; fault diagnosis

0 引言

某型弹载二次电源在组装、调试中需反复测试, 现有一体化测试平台能根据各端口输出参数提示故障, 测试人员根据提示对部件、元器件逐个进行测试检查。这对人员能力水平要求较高, 且效率低下。一体化测试台增加故障诊断、定位, 可提升工作效率, 降低调试难度。

目前, 贝叶斯网络、人工神经网络、遗传算法等均在故障诊断研究中有较为广泛的应用。对比上述方法, 模糊 Petri 网 (fuzzy Petri net, FPN) 更符合人类的思维和认知方式, 体现了 Petri 网的同步和并发能力^[1], 其图形化的方法直观地描述了离散事件系统的各种关系和行为, 且使用矩阵计算方式, 适用于计算机建模。笔者在传统模糊 Petri 网的基础上建立故障诊断模型, 引入变迁概率信息的概念, 阐述规则表述形式, 推演矩阵算法。最后通过对实例进行建模分析运算, 证明该模型是准确的, 能够作为开发该产品一体化测试台故障诊断功能的理论支撑。

1 模糊概率 Petri 网知识表示推理

1.1 概率信息的表述

模糊 Petri 网在描述故障传播时, 变迁表示的是一种必然性, 即某个或多个前提条件成立, 变迁启动, 结果成立。而故障诊断指观测到某一故障现象后, 寻找导致其发生的原因, 即确定最有可能启动的变迁, 找寻故障传播的路径, 是对故障传播模型进行相反方向推理的过程。如图 1 所示, 实线表示故障传播的方向, 虚线表示故障诊断的推理过程。推理的起点为已检测到电压输出故障, 推理的最终目标为找寻损坏的电阻究竟是 R_1 或 R_2 。在这个过程中, 无法判断究竟哪个变迁启动引起的故障, 这就产生了冲突。文献[2-3]通过比较变迁置信度的大小来解决推理中的冲突问题。实际上, 变迁的置信度表示在满足前提条件的情况下, 变迁发生所引发命题成立的确定性, 表示由已知前提条件推得结果的可信度。对于故障诊断而言, 已出现故障现象, 能够导致其发生的单个、部分甚至全部变迁均已启动, 其置信度为 1, 在这种情况下比较变迁置信度是没有意义的。

收稿日期: 2018-09-01; 修回日期: 2018-10-07

作者简介: 赵 铮(1985—), 男, 辽宁人, 硕士, 工程师, 从事军械装备质量监督研究。

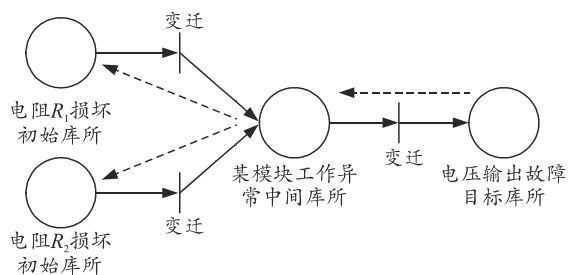


图 1 故障传播及诊断

为消解推理过程中的冲突，根据文献[4]中关于概率信息的思想，笔者引入变迁概率信息 $T_{pr} \in [0,1]$ 。它是专家给定概率与复杂系统运行信息的函数，在故障现象已知的情况下，通过比较 T_{pr} 确定可能性最大的变迁，进而提示故障原因，有效增强了模糊 Petri 网的推理能力，解决了冲突问题。变迁概率信息定义：已知故障现象，可引发这一故障现象的变迁满足启动条件的可能性，由专家根据系统实际情况给出，与系统运行状态、元器件型号、质量等级和故障率等相关，并根据历史统计数据不断修正。变迁概率只具备局部性，不具备全局性，同一故障相关的变迁概率才具备可比性，因此明确各相关变迁概率大小较明确其精确值更有意义。

1.2 模糊概率 Petri 网定义

定义：模糊概率 Petri 网 (probability fuzzy Petri net, PFPN) 可以定义为一个七元组^[5]：

$$S_{PFPN} = \{P, T, \alpha, \beta, I, O, T_{pr}\}。$$

式中： $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\} (n \geq 1)$ 为库所结点的有限集合； $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\} (m \geq 1)$ 为变迁结点的有限集合； $\alpha \subseteq P \times T$ 和 $\beta \subseteq T \times P$ 表示库所到变迁和变迁到库所的有向弧； I_m 和 O_m 是变迁 T_m 的输入库所和输出库所的有限集合； $T_{pr} = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\} (\mu_n \in [0,1])$ 表示对应变迁节点在其后续库所已发生的前提下启动的概率。

1.3 模糊概率 Petri 网规则表示

全网的目标库所代表已出现的故障现象，存在唯一性。初始库所表示可能导致故障出现的各种原因，即待分析的故障底事件。除目标库所和初始库所外，模型中还可能存在中间库所。典型的模糊产生式规则表示为：IF-THEN(T_{pr})结构，即规则前提-规则结论(规则发生概率)表示方式。用模糊概率 Petri 网的一个变迁输入库所表示规则前提部分，输出库所表示规则结论部分，并且规则的前提部分、结论部分均可含有 and、or 关系，那么一个模糊概

率 Petri 网模型就可由数条模糊产生式规则来描述。

模糊产生式规则通常可划分为如下几种：

- 1) IF P_1 and P_2 and \dots and P_n THEN $P_k (T_{pr} = \mu_i)$;
- 2) IF P_1 THEN P_2 and \dots and $P_n (T_{pr} = \mu_i)$;
- 3) IF P_1 or P_2 or \dots or P_n THEN $P_k (T_{pr} = \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ 。

需要说明的是，类似 IF P_1 THEN P_2 or \dots

or $P_n (T_{pr} = \mu_i)$ 的规则不应出现在应用于故障诊断的模糊概率 Petri 网模型中，因为针对多个结论(即故障现象)，应逐个地单独建模分析，否则无法演绎推理。

1.4 模糊概率 Petri 网推理

对于一个具有 n 个库所 m 个变迁的模糊概率 Petri 网模型，其矩阵表示的定义如下：

令矩阵 $A = [a_{ij}]$ 为输入映射矩阵 IIM(input incidence matrix)，其中 A 为 m 行 n 列的 2 维矩阵，其元素 a_{ij} 表示从库所 P_j 到变迁 T_i 是否存在一条有向弧。如果存在， $a_{ij} = 1$ ；否，则 $a_{ij} = 0$ 。

令矩阵 $B = [b_{ij}]$ 为库所可达矩阵 PRM(place reachable matrix)，其中 B 为 n 行 n 列的 2 维矩阵，其元素 b_{ij} 表示库所 P_j 经过有向弧、变迁直接或间接可达库所 P_i ， $b_{ij} = 1$ ；否，则 $b_{ij} = 0$ 。同时规定库所对自身可达。

令矩阵 $C = [c_i]$ 为变迁概率矩阵 TPM(transition probability matrix)，其中 C 为 m 列的 1 维矩阵，元素 c_i 为变迁 T_i 在其后续库所已发生的前提下启动的概率。

令运算符 \otimes 代表矩阵直乘算法， G 为 n 列 1 维矩阵， H 为 n 行 n 列 2 维矩阵， $K = G \otimes H$ ，则 $k_{ij} = g_j \times h_{ij}$ 。

令运算符 \oplus 代表矩阵自乘算法， D 为 n 列 1 维矩阵， F 为 n 行 n 列 2 维矩阵，其含义为如果 $D = F^\oplus$ ，则矩阵 D 中 $d_j = f_{1j} \times \dots \times f_{ij} \times \dots \times f_{nj}, f_{ij} \neq 0$ 。

推理过程：首先输入初始矩阵 A 、 B 、 C 的数值，而后根据公式 $P^* = (C \times A \otimes B)^\oplus$ 进行运算，计算得出全部库所的整体概率矩阵 P^* ，即在故障已经发生的情况下，可能导致该故障的初始库所、中间库所分别可能发生的概率组成的矩阵。最后从 P^* 中提取初始库所的概率值，并按由大到小排序，组成新的矩阵 P^* ，即为故障原因提示序列矩阵，至此推理

结束。

2 故障诊断实例

笔者以某型弹载二次电源 5 V 输出端口短路故障为例, 选取具有代表性的部分电路, 建立模糊概率 Petri 网故障诊断模型^[6], 验证笔者提出的知识表示方法及推理算法的有效性。模糊产生式规则表达如下:

1) IF 二极管 D1 短路 (P_1) or 电容 C_1 短路 (P_2) THEN 调整网络故障 (P_5) ($T_{pr} = 31\%, 69\%$);

2) IF 二极管 D2 短路 (P_3) and 电容 C_2 短路 (P_4) THEN 滤波网络故障 (P_6) ($T_{pr} = 100\%$);

3) IF 调整网络故障 (P_5) or 滤波网络故障 (P_6) THEN 5V 输出端口短路 (P_8) ($T_{pr} = 59\%, 39\%$);

4) IF 控制芯片短路 (P_7) THEN 5V 输出端口短路 (P_8) ($T_{pr} = 2\%$)。

以上规则的模糊概率 Petri 网表示如图 2 所示, 其输入映射矩阵 A 、库所可达矩阵 B 、变迁概率矩阵 C 如式(1)所示。

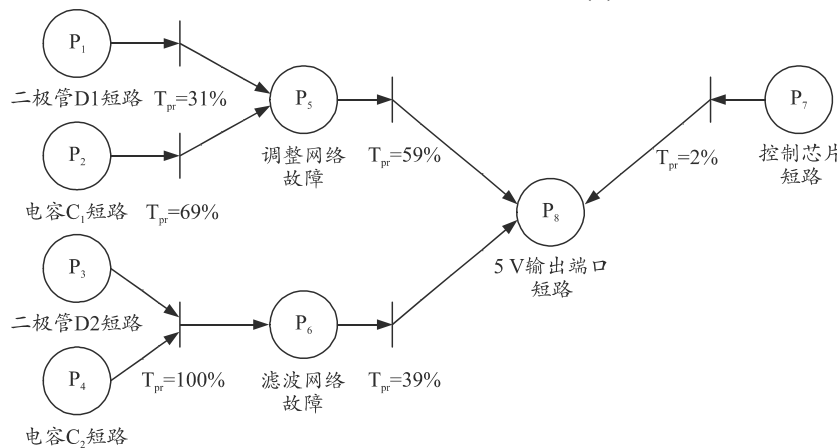


图 2 5 V 输出端口短路故障模糊概率 Petri 网模型

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0.31 \\ 0.69 \\ 1 \\ 0.59 \\ 0.39 \\ 0.02 \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

根据前文阐述的推理公式 $P^* = (C \times A \otimes B)^{\oplus}$ 可求得 $P^* = [0.1829 \ 0.4071 \ 0.39 \ 0.39 \ 0.59 \ 0.39 \ 0.02 \ 0]$, 再从 P^* 中提取初始库所的概率值, 并按由大到小排序, 组成新的矩阵 $P = [0.4071 \ 0.39 \ 0.39 \ 0.1829 \ 0.02]$, 至此推理结束。根据推理结果, 故障诊断系统将提示在 5 V 输出端口短路的情况下, 最可能导致该故障原因排序为: P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_1 、 P_7 , 即电容 C_1 短路、二极管 D2 短路、电容 C_2 短路、二极管 D1 短路、控制芯片短路。测试人员可根据提示逐一检查并排除故障。

实例结果表明: 模糊概率 Petri 网知识表达清晰、直观, 特别是利用其可进行并行推理的特性, 通过简单的矩阵运算能快速得出推理结论, 即故障

原因提示序列, 便于在计算机上实现故障诊断功能。

3 结束语

笔者在传统模糊 Petri 网的基础上, 引入了变迁概率信息, 阐述了模糊产生式规则以及严密的推理算法, 并选取某型弹载二次电源 5 V 输出端口短路故障进行建模验证。验证结果表明: 模糊概率 Petri 网适用性强, 基于矩阵的推理运算清晰、高效, 易于诊断模型库的扩充、维护, 能够作为计算机故障诊断系统的理论支撑。

参考文献:

[1] 杨健维, 何正友, 臧天磊. 基于方向性加权模糊 Petri 网的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010,

30(34): 42-49.

- [2] 廉小亲, 王信义, 朱小燕. 故障诊断系统中模糊推理算法的研究[J]. 北京理工大学学报, 1996, 16(1): 97-101.
- [3] 杨其宇, 张霞. 模糊 Petri 网故障诊断技术应用[J]. 兵工自动化, 2006, 25(4): 73-74.
- [4] 李厦. 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]. 上海: 同济大学, 2006: 59-60.

- [5] CHEN S M. Weighted fuzzy reasoning using weighted fuzzy Petri nets[J]. IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, 2002, 14(2): 386-397.
- [6] 朱国勇, 陈龙淼. 链式自动化弹仓的自适应模糊滑模控制[J]. 兵工自动化, 2017, 36(8): 1-4.

(上接第 8 页)

由图可以看出：经过杆臂误差补偿后，输出数据的误差明显减小。在单轴旋转寻北过程中，转动装置的存在会增大尺寸效应误差，相当于引入了新的常值漂移，造成加速度计测得了一个额外的加速度信号，在长时间的旋转过程中，转动装置的存在可以实现误差的相互抵消，不会引起导航定位误差的发散。理论分析和仿真结果表明：加速度计尺寸误差不会引起定位误差的发散，但会增加无阻尼系统速度误差的振荡幅值^[8]。

4 结论

笔者主要研究了加速度计互相垂直安装的情况，详细推导了内杆臂误差效应的原理公式，分析了产生原因，得出研究分析结果：内杆臂效应导航速度增量与旋转中心无关，而与内杆臂长度、IMU 的旋转角速度成正比，并分析了内杆臂误差效应在惯导系统寻北过程中的影响。笔者仅对垂直安装情况进行分析与讨论，如果 3 个加速度计不垂直或者敏感轴延长线并不相交于一点时，这种情况下误差的分析和补偿讨论就比较复

杂，需要进一步深入分析。

参考文献：

- [1] 袁保伦, 饶谷音. 光学陀螺旋转惯导系统原理探讨[J]. 国防科技大学学报, 2007, 28(6): 76-80.
- [2] DAVID H T, JOHN L W. 捷联惯性导航技术[M]. 张天光, 王秀萍, 王丽娜, 等, 译. 北京: 国防工业出版社, 2007: 36-126.
- [3] 严恭敏, 严卫生, 徐德民. 捷联惯性测量组件中内杆臂效应分析与补偿[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(2): 148-153.
- [4] 陈永冰, 钟斌. 惯性导航原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 135-150.
- [5] 汪徐胜, 杨建业, 宋仔标, 等. 车载旋转调制捷联惯导系统最优对准技术[J]. 兵工自动化, 2017, 36(4): 10-17.
- [6] 于旭东, 王宇, 张鹏飞, 等. 单轴旋转对惯导系统误差特性的影响[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(6): 643-648.
- [7] 黄锡成. 高精度激光陀螺寻北技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] 杨其, 苏国华, 刘庆宝, 等. 纵向振动对捷联惯导误差影响半解析表达式研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017(8): 14-16.