

基于 AFPN 的舰船电子综合化系统 总线故障诊断研究

单士华, 李 展

(黄河科技学院, 郑州 450063)

摘要: 针对舰船电子综合化系统总线故障诊断模糊性、不确定性的日益增强, 且难以实现快速故障诊断的难题, 提出一种基于自适应模糊 Petri 网 (Adaptive Fuzzy Petri Net, AFPN) 的舰船电子综合化系统总线故障诊断方法; 在加权模糊 Petri 网 (Weighted Fuzzy Petri Net, WFPN) 的基础上, 引入神经网络技术, 给出了 AFPN 的形式化定义及学习算法; 实例分析验证了所提方法的有效性, 研究表明: AFPN 模型具有很强的自适应能力和推理能力, 克服了传统单纯依靠人工经验故障诊断的不确定性和偶然性, 可以实现舰船电子综合化系统总线快速精确的故障诊断。

关键词: 舰船电子综合化系统; 自适应模糊 Petri 网; 总线; 故障诊断

Fault Diagnosis of Bus of Integrated Ship Electronic System Using Adaptive Fuzzy Petri Net

Shan Shihua, Li Zhan

(Huanghe Science and Technology College, Zhengzhou 450063, China)

Abstract: In view of the problem that there are more fuzziness and uncertainty in the fault diagnosis (FD) of bus of integrated ship electronic system and it is hard to achieve FD rapidly, this paper proposed a new approach of FD for bus of integrated ship electronic system by adaptive fuzzy petri net (AFPN). On the basis of weighted fuzzy petri net (WFPN), neural network technology is introduced and the formalize definition and learning algorithm of AFPN are given. A case study of BN is given to verify the proposed approach. The case study shows that the AFPN model has good adaptive ability and reasoning ability, avoiding the uncertainty and contingency coming from personnel experience. The proposed approach can achieve FD of bus of integrated ship electronic system rapidly and accurately.

Keywords: integrated ship electronic system; adaptive fuzzy Petri net; bus; fault diagnosis

0 引言

随着舰船电子综合化系统数字化、智能化水平不断提高, 系统结构越来越复杂, 为保证其安全、可靠、高品质运行, 必须对其基于总线构成的系统进行快速的故障诊断^[1-2]。然而对舰船电子综合化系统总线进行故障诊断的精确性无法得到保证, 其模糊性和不确定性日益增强。传统方法无法处理舰船电子综合化系统总线中这种具有模糊特性的故障诊断, 为此该工作具有一定的挑战性。

模糊 Petri 网 (Fuzzy Petri Net, FPN) 是一种高级 Petri 网技术, 可以描述系统中各类模糊知识及其因果关系, 已经在航空、导弹等领域的总线故障诊断中得到了应用。文献 [3] 应用 FPN 建立了航电总线系统的故障诊断模型, 经过模型推理得到了初步的研究结果; 文献 [4] 将 FPN 引入到了导弹 1553B 总线系统中进行故障诊断, 结合实弹实验数据得到了基本一致的诊断结果; 文献 [5] 进一步扩展了假设条件, 引入加权模糊 Petri 网 (Weighted Fuzzy Petri Net, WFPN) 进行了 1553B 总线网络故障诊断研究; 上述研究都取得了一定的研究成果, 但是模型参数限于少数人工经验知识, 缺乏自学习

能力, 无法自适应于各种情况下的故障诊断。自适应模糊 Petri 网 (Adaptive Fuzzy Petri Net, AFPN) 是对 WFPN 新的补充和完善, 引入了神经网络技术, 使得 AFPN 模型具有较强的自学习能力和自适应性, 已经得到学术界和工程界的重视与研究^[6-8]。本文的目的在于探讨 AFPN 技术在舰船电子综合化系统总线故障诊断中应用, 为相关研究提供有益参考。

1 舰船电子综合化系统总线故障分析

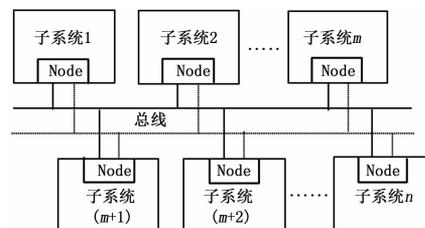


图1 舰船电子综合化系统总线拓扑结构

1.1 故障分析

如图1所示为某舰船电子综合化系统总线拓扑结构。舰船电子综合化系统总线故障主要由总线链路故障和总线终端故障引发的。总线链路故障主要由线缆插头松动和阻抗故障引发的。总线终端故障主要由接口电压不稳定、软件配置错误和电磁干扰引发的。可见, 舰船电子综合化系统总线中故障现象与故障原因之间是一种不确定的模糊关系。

收稿日期: 2014-01-15; 修回日期: 2014-03-07。

作者简介: 单士华(1971-), 女, 河南郑州人, 硕士, 讲师, 主要从事舰船电子综合化技术方向的研究。

1.2 故障规则表示

舰船电子综合化系统总线中故障现象与故障原因之间的模糊关系可以用故障模糊产生式规则 (fuzzy production rule, FPR) 描述。模糊产生式规则的基本形式为:

$$R_k: IF d_i THEN d_j (cf = \mu_k)$$

式中, R_k 表示舰船电子综合化系统总线中第 k 个模糊产生式规则, 用于表示故障现象和故障原因之间的对应关系; d_i 和 d_j 分别表示舰船电子综合化系统总线中第 i 和 j 个命题, 用于表示故障现象和故障原因; μ_k 表示舰船电子综合化系统总线中第 k 个模糊产生式规则的置信度。

2 自适应模糊 Petri 网及其参数训练算法

2.1 自适应模糊 Petri 网定义

定义 1: 自适应模糊 Petri 网^[6,8]可以定义为一个 10 元组: $AFP_N = (P, T, D, I, O, \alpha, \beta, cf, Th, W)$, 其中:

- (1) $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 为库所的有限集合;
- (2) $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 为变迁的有限集合;
- (3) $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 为命题的有限集合, $|D| = |P|$, $P \cap T \cap D = \emptyset$;
- (4) $I(O): T \rightarrow P^m$ 是输入 (输出) 函数, 为变迁到库所的映射;
- (5) $\alpha: P \rightarrow [0, 1]$ 为库所到真值的一一映射;
- (6) $\beta: P \rightarrow D$ 为库所到命题的一一映射;
- (7) $cf: T \rightarrow [0, 1]$ 为变迁对应规则的置信度, $\mu_j \in [0, 1]$, $j = 1, 2, \dots, m$ 表示变迁 t_j 的置信度;
- (8) $Th: T \rightarrow [0, 1]$ 为变迁的激活阈值, $\lambda_j \in [0, 1]$, $j = 1, 2, \dots, m$ 表示变迁 t_j 的激活阈值;
- (9) $W = W_I \cup W_O, W_I: I \rightarrow [0, 1]$ 和 $W_O: O \rightarrow [0, 1]$ 是输入输出的权值集合;

在自适应模糊 Petri 网中, 模糊产生式规则主要有 3 类^[4-5]:

- (1) 简单规则: $R_k: if d_1$ then $d(cf = \mu, \lambda, \omega)$, 其 AFPN 表示如图 2 (a);
- (2) 与规则: $R_k: if d_1$ and d_2 and \dots and d_n then $d(cf = \mu, \lambda, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$, 其中: $\omega_i \in [0, 1], i = 1, 2, \dots, n$, 且 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$, 其 AFPN 表示如图 2 (b);
- (3) 或规则: $R_k: if d_1$ or d_2 or \dots or d_n then $d(cf = \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n; \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n; \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$, 其中: $\omega_i = 1, i = 1, 2, \dots, n$, 其 AFPN 表示如图 2 (c) 所示。

2.2 自适应模糊 Petri 网的参数训练算法

在舰船电子综合化系统总线故障诊断过程中, 其 AFPN 模型的权值 ω 和变迁的置信度 μ 大多依赖于少数专家经验, 不容易确定具体的数值。为此, 引入具有良好学习能力的神经网络技术自适应的调整 AFPN 模型参数^[6-7]。本文采用 BP 算法调整 AFPN 模型的权值 ω 和变迁的置信度 μ 。

选择 Sigmoid 函数作为 AFPN 模型的变迁的输出函数:

$$g(x) = 1 / (1 + e^{-b(x-\lambda)}) \quad (1)$$

式 (1) 中, λ 为变迁的激活阈值, b 为常数。若 b 足够大, 则 $x \geq \lambda$ 时, $g(x) \approx 1$; 当 $x < \lambda$ 时, $g(x) \approx 0$ 。基于此, 在自适应模糊推理过程中, 定义连续函数 $G(x)$ 逼近 $\alpha(p)$:

$$\alpha(p) = G(x) = g(x) \cdot x \cdot \mu \quad (2)$$

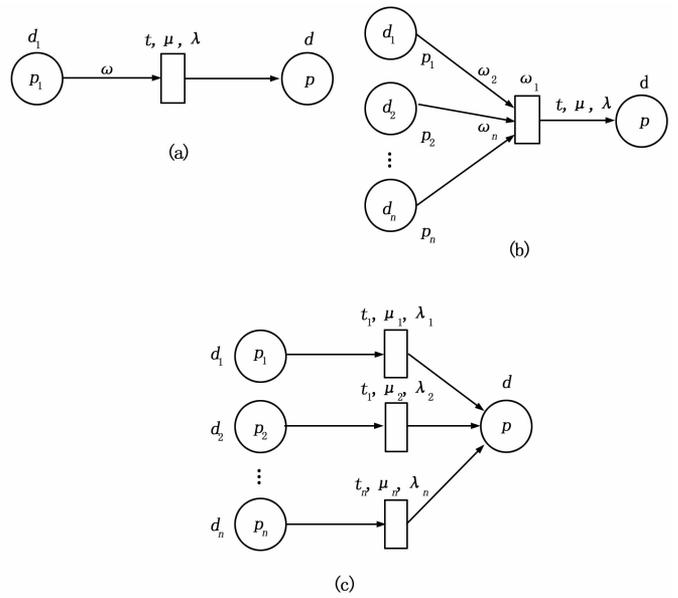


图 2 模糊产生式规则的 AFPN 表示

式 (2) 中, $x = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \omega_i$, 输出误差 $e_n = G(x) - \bar{G}(x)$, AFPN 模型的权值调整如下:

$$\begin{cases} W^{(n-1)}(k+1) = W^{(n-1)}(k) + \eta_{n-1} \cdot \dot{G}^{(n-1)} \cdot e_{n-1} \cdot \Gamma^{(n-1)} \cdot \\ W^1(k+1) = W^1(k) + \eta_1 \cdot \dot{G}^1 \cdot e_1 \cdot \Gamma^1 \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中, η 为学习速率, $\Gamma = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T$, $\dot{G} = \frac{d}{dx} \left[\frac{\mu \cdot x}{1 + e^{-b(x-\lambda)}} \right]$ 。

AFPN 模型的学习算法如下:

- 步骤 1: 将模型中的权值 ω 和变迁的置信度 μ 初始化为一组随机数;
- 步骤 2: 输入 r 批训练样本, 采用 BP 算法不断自适应调整模型的权值;
- 步骤 3: 假设模型中有 q 个终止库所, 使得 $\alpha(p)$ 不断逼近 $\alpha'(p)$, 直到 $E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^q (\alpha_i(p_j) - \alpha'(p_j))^2 < \epsilon$, 其中: ϵ 为训练算法的期望精度值。

3 实例研究

3.1 某舰船电子综合化系统总线故障诊断 AFPN 模型

以某舰船电子综合化系统总线为目标系统, 首先将各种故障现象和故障原因定义为对应的各种命题如表 1 所示。

表 1 AFPN 模型中命题及其含义

命题	含义	命题	含义
d_1	电磁干扰	d_5	线缆插头松动
d_2	接口电压不稳定	d_6	总线终端故障
d_3	软件配置错误	d_7	总线链路故障
d_4	阻抗故障	d_8	总线故障

在此基础上, 建立该型舰船电子综合化系统总线故障诊断规则库如下:

规则 1: $R_1: If d_1, then d_6$;

- 规则 2: R_2 : If d_2 , then d_6 ;
- 规则 3: R_3 : If d_3 , then d_6 ;
- 规则 4: R_4 : If d_4 , then d_7 ;
- 规则 5: R_5 : If d_5 , then d_7 ;
- 规则 6: R_6 : If d_6 , then d_8 ;
- 规则 7: R_7 : If d_7 , then d_8 .

将上述规则库等效为 AFPN 模型, 如图 3 所示。

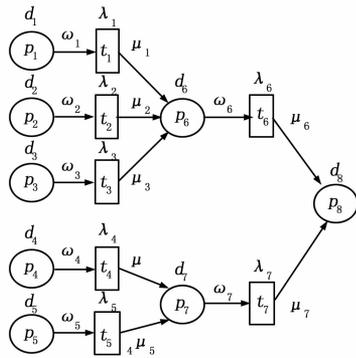


图 3 舰船电子综合化系统总线故障诊断的 AFPN 模型

3.2 AFPN 模型推理

由舰船电子综合化系统总线故障诊断的 AFPN 模型可知该模型分为两层, 设 $g(x) = 1/(1 + e^{-b(x-\lambda)})$, 其中: $b = 3000$, 算法学习速率 $\eta = 0.05$, 算法精度 $\varepsilon = 0.0001$ 。由于采用 BP 算法可以调整模型的权值 ω 和变迁的置信度 μ , 因此这里结合实际应用, 可以假设模型中所有变迁的激活阈值近似为 0.5, 即: $\lambda_j = 0.5, j = 1, 2, \dots, 7$ 。根据专家经验, 初始化 AFPN 模型的权值和变迁的置信度, 使用 50 批样本对舰船电子综合化系统总线故障诊断 AFPN 模型进行训练, 最后得到训练结果如表 2 所示。

表 2 AFPN 模型训练结果

名称	经验值	训练值	名称	经验值	训练值
ω_1	0.53	0.526 1	μ_1	0.38	0.359 7
ω_2	0.65	0.681 8	μ_2	0.73	0.755 6
ω_3	0.96	0.933 9	μ_3	0.91	0.939 1
ω_4	0.85	0.877 2	μ_4	0.86	0.823 8
ω_5	0.55	0.590 7	μ_5	0.60	0.644 7
ω_6	0.90	0.949 1	μ_6	0.86	0.891 1
ω_7	0.88	0.928 5	μ_7	0.78	0.748 3

完成 AFPN 模型参数训练后, 选择 5 批测试样本作为输入对训练后的 AFPN 模型进行模糊推理。这里选取某个测试样本作为输入进行说明, 该测试样本为: $\alpha(p_1) = 0.96, \alpha(p_2) = 0.78, \alpha(p_3) = 0.69, \alpha(p_4) = 0.76, \alpha(p_5) = 0.97$ 。判断模型中变迁 t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 是否可以激活, 由于 $\alpha(p_i) \cdot \omega_i > \lambda_i, i = 1, 2, 3, 4, 5$, 可知变迁 t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 都能激活, 则 $\alpha(p_6) = \max\{\alpha(p_1) \cdot \omega_1 \cdot \mu_1, \alpha(p_2) \cdot \omega_2 \cdot \mu_2, \alpha(p_3) \cdot \omega_3 \cdot \mu_3\} = 0.6051$ $\alpha(p_7) = \max\{\alpha(p_4) \cdot \omega_4 \cdot \mu_4, \alpha(p_5) \cdot \omega_5 \cdot \mu_5\} = 0.5492$ 。进一步判断模型中变迁 t_6, t_7 是否可以激活, 由于 $\alpha(p_i) \cdot \omega_i > \lambda_i, i = 6, 7$ 可知变迁 t_6, t_7 均可以激活, 则 $\alpha(p_8) = \max\{\alpha(p_6) \cdot \omega_6 \cdot \mu_6, \alpha(p_7) \cdot \omega_7 \cdot \mu_7\} = 0.5118$ 。诊断结果为: 该测试样本数据可以导致舰船电子综合化系统总线故障的发生, 其原因是总线终端软件配置错误引发的, 该推理结果与海上作业中实际测试一致。

4 结论

本文提出一种基于自适应模糊 Petri 网的舰船电子综合化系统总线故障诊断方法。该方法具有很强的自适应能力和推理能力, 克服了传统单纯依靠人工经验故障诊断的不确定性和偶然性, 可以实现舰船电子综合化系统总线快速精确的故障诊断。下一步研究将考虑使用遗传、蚁群等多种智能算法进一步增强 AFPN 模型的自适应能力和学习能力。

参考文献:

- [1] 吴文铁. 基于 CPN 的舰船电子综合化系统总线建模 [J]. 计算机应用与软件, 2012, 29 (11): 116-118.
- [2] 胡国鹏. 基于现场总线的舰船网络及其互连技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- [3] 张宇浩, 吴勇, 张建东. 模糊 Petri 网在航电总线系统故障诊断中的研究 [J]. 测控技术, 2011, 30 (6): 80-82.
- [4] 桑亚辉, 张一帆. 基于 FPN 的弹载 1553B 总线系统故障诊断研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (5): 1251-1253.
- [5] 贾民力, 赵学民. 基于 WFPN 的 1553B 总线网络故障诊断研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (8): 2056-2058.
- [6] 马敏, 黄建国, 夏侯士戟. 基于自适应模糊 Petri 网的雷达故障诊断方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29 (2): 261-265.
- [7] 刘心, 印桂生, 张磊. 一种自适应模糊 Petri 网及其应用 [J]. 计算机应用研究, 2009, 26 (10): 3801-3803.
- [8] 潘海兰, 蒋文蓉, 吴嘉琪. 基于自适应神经网络加权模糊故障诊断研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (7): 1599-1601.

(上接第 2020 页)

- [3] 吴佳兴, 李爱国. 基于云计算的智能家居系统 [J]. 计算机应用与软件, 2013, 30 (7): 1-3.
- [4] 樊宁. 基于 Android 平台的无线控制系统设计与实现 [D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
- [5] 孟潜, 朱天宇. 一种基于智能手机的新移动医疗系统模式 [J]. 计算机应用研究, 2013, 30 (7): 1-2.
- [6] DevDiv 移动开发社区. iOS 开发实战体验 [M]. 北京: 海洋出版社, 2012.

- [7] 汪宇, 吕卫, 杨博菲, 等. 基于 Android 平台的智能家居监控系统 [J]. 电视技术, 2012, 36 (2): 2-3.
- [8] 阮越广. 基于 SimplicTI 的无线智能热量表硬件设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2012, (1): 2-3.
- [9] 赵明富. 基于 GSM/GPRS 的变电站遥控系统 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25 (8): 33-34.
- [10] 汤国峰, 刘猛, 黄卫佳, 等. 双轴倾斜角度测量系统设计 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28 (12): 83-85.