

[文章编号] 1003-4684(2019)02-0028-04

# 基于模糊 Petri 网的船闸故障诊断模型研究

邹琪骁<sup>1</sup>, 刘 辉<sup>1</sup>, 姜晓彤<sup>1</sup>, 李青峰<sup>2</sup>, 孙 杰<sup>2</sup>, 陈启明<sup>3</sup>, 赵红红<sup>3</sup>

(1 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068;

2 国网新源水电有限公司富春江水力发电厂 浙江 桐庐 311504; 3 武汉四创自动控制技术有限责任公司, 湖北 武汉 430065)

[摘 要] 为提高船闸系统的协调性与实时性, 建立高精度的船闸故障诊断系统, 使用具有更强推理性的 Petri 网对船闸系统进行建模, 分析其各点状态从而能对船闸状态有更好的了解, 使控制及检修策略更具有针对性。算例分析证明该方法实现了网络的数据关联分析, 提高了故障诊断的快速准确性。

[关键词] 船闸系统; 分布式控制; 模糊 Petri 网; 故障诊断

[中图分类号] TN913.7

[文献标识码] A

针对高精度船闸故障诊断系统的建模, 国内外学者做出了很多探索。文献[1-2]从工程全寿命周期管理角度去选择运维策略, 为了实现故障的实时诊断, 具有快速诊断优势的 Petri 网模型及其改进算法被广泛应用在各工业系统的故障诊断领域。文献[3]介绍了航天复杂系统的加权故障诊断模型, 利用 BP 神经网络优化 Petri 参数。文献[4]利用 BP 神经网络优化模糊 Petri 网参数, 并将此应用于电机故障诊断。为了提高故障诊断的快速性和大数据情况下的挖掘有效性, 不少学者提出了改进故障 Petri 网模型和推理算法: 文献[5]为了解决传统模糊 Petri 网单一隶属度的缺陷, 提出一种直觉模糊 Petri 网(IFPN), 结合直觉模糊理论和 Petri 理论, 建立了 Petri 网模型, 比 FPN 更全面准确地进行诊断。文献[6]在数据驱动技术下提出一种基于相似弹性窗的处理动态时滞分析方法和相关过程变量的动态时延分析方法。本文创新性地提出将改进的 Petri 网模型和推理算法应用于基于 PLC 控制的船闸故障诊断系统, 对其故障进行状态评估, 实现船闸系统的快速故障诊断。

本文依据 Petri 网的改进算法, 建立了基于模糊 Petri 网的船闸故障诊断模型。再依据船闸的基本结构及其控制系统和改进 Petri 网的基本算法, 建立了船闸系统的模糊 Petri 网, 通过数据的关联分析来确定 Petri 的置信度和规则, 将其加入条件

库所。通过算例分析, 根据其中各部分健康监测装置得出的数据, 结合关联规则实现了对船闸故障的实时处理, 验证了模型的实用性。

## 1 船闸的基本结构及其控制系统

船闸系统划分成两个单元, 分别是电气控制单元和闸门单元。闸门单元一般由上游引航道、上游阀门、闸室、下游阀门、下游引航道、下游泄水尾门及水槽等相应设备组成。电气控制单元主要包括 PLC 主控系统单元、电气控制单元、船闸传动控制单元和信号检测单元, 并且三个单元都与主控 PLC 单元连接。在实际船闸控制系统中, 各单元位置如图 1 所示。在本次建模当中, 根据船闸故障系统监测信号做出了相应的合并及简略, 其中闸门单元包括三相交流电箱, 减速箱, 活动闸门和开度仪四个部分, 而电气控制单元包括 CPU、变频器、水位信息收集装置、操作按钮四个部分。

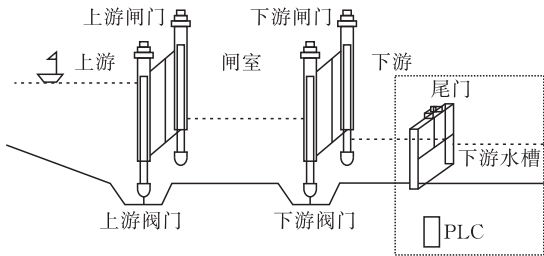


图 1 船闸系统

[收稿日期] 2018-11-20

[第一作者] 邹琪骁(1995-), 男, 湖北武汉人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化人,

[通信作者] 刘 辉(1962-), 男, 湖北武汉人, 理学博士, 湖北工业大学教授, 研究方向为电气工程

## 2 基于模糊 Petri 网的船闸故障诊断系统建模

### 2.1 模糊 Petri 网(FPN)简介

经典 Petri 网模型是一个三元组  $(P, T, F)$ 。其中  $P$  表示库所集合,涵盖所有的状态元素。 $T$  表示变迁集合。 $F$  表示流关系。经典 Petri 网模型可用于明确、量化的推理场景中。船闸系统状态评估为模糊推理,难以采用经典 Petri 网模型。模糊 Petri 网(fuzzy petri nets, FPN)在经典 Petri 网的基础上,具有了模糊推理特性和良好的容错能力,适用于本模型。

定义 1<sup>[7]</sup> 模糊 Petri 定义为一个 8 元组。 $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n\}$  表示有限库所集合,库所中包括目标故障和异常征兆,是系统运行前后通过观察、测量或试验得到的; $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$  表示有限变迁集合,即部件的行为动作或者状态变化; $D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_n\}$  为命题集合,  $P \cap T \cap D = \Phi$  (空集),  $|P| = |D|$ ;  $I: P \times T \rightarrow N$  是输入函数,  $N = \{0, 1, 2, \dots\}$  为非负整数集,表示库所到变迁的映射; $O: T \times P \rightarrow N$  是输出函数,  $N = \{0, 1, 2, \dots\}$  为非负整数集,表示变迁到库所的映射; $f: P \rightarrow [0, 1]$  对每一库所分配一个置信度  $CF$ ,用  $\theta$  表示; $\alpha: T \rightarrow [0, 1]$  对每一变迁分配一个置信度  $CF$ ,用  $\mu$  表示; $\beta: P \rightarrow D$  为每一节点的库所和命题间的映射。

变迁和触发采用的规则如下:  
在系统标识  $m_1$  下,对于变迁,若

$$\forall P_j \in I(T_i): m_2(P_j) = m_1(P_j) - 1 \wedge \alpha(P_j) = \theta \geq \lambda$$

这里  $\lambda \in [0, 1]$  为  $T_i$  的阈值,为在系统标识  $m_1$  下  $P_j$  的中肯托数量,则  $T_i$  称使能,触发则得到系统新的标识  $m_2$ ;

$$\begin{aligned} &\forall P_j \in I(T_i): m_2(P_j) = m_1(P_j) - 1 \\ &\forall P_k \in O(T_i): m_2(P_k) = m_1(P_k) + 1 \wedge \alpha(P_j) = \theta_i \times \mu_i \end{aligned}$$

模糊产生式规则知识有以下几种形式。

Type1: if  $d_i$  then  $d_k (CF = \mu_i)$  即  $d_i \rightarrow d_k$   
Type2: if  $d_i$  and  $d_j$  then  $d_k (CF = \mu_i)$  即  $d_i \cap d_j \rightarrow d_k$   
Type3: if  $d_i$  or  $d_j$  then  $d_k (CF = \mu_i)$  即  $d_i \cup d_j \rightarrow d_k$   
其中,  $d_i, d_j, d_k$  是包含一些模糊变量的命题,  $d_i, d_j$  表示前提或者状态,  $d_k$  表示动作或结论,  $\mu_i \in [0, 1]$  是规则的置信度。基于模糊产生式规则的模糊 Petri 网基本描述可分为以下三种情况。

前件命题由 AND 组成,规则形式为

$$\text{if } d_1 \text{ and } \dots \text{ and } d_n \text{ then } d_k (CF = \mu_i)$$
$$CF(d_k) = \min(\theta_{d_1}^0, \theta_{d_2}^0, \dots, \theta_{d_n}^0) u_i =$$

$P(d_k/d_1 d_2, \dots, d_n)$   
 $\theta_{d_1}^0, \theta_{d_2}^0, \theta_{d_3}^0, \dots, \theta_{d_n}^0$  各提前库所的可信度。相应的 Petri 网如图 2 所示。

结论命题由 AND 组成,规则形式为

$$\text{if } d_1 \text{ and } \dots \text{ and } d_n \text{ then } d_k (CF = \mu_i)$$
$$CF = P(d_{k1} d_{k2}, \dots, d_{kn}/d_i)$$

前件命题由 OR 组成,规则形式为

$$\text{if } d_1 \text{ or } \dots \text{ or } d_n \text{ then } d_k (CF = \mu_i)$$
$$CF(d_k) = \max(\theta_{d_1}^0 \mu_i, \theta_{d_2}^0 \mu_2, \dots, \theta_{d_n}^0 \mu_n) = P(d_k/d_n)$$

其中  $\theta_{d_1}^0, \theta_{d_2}^0, \theta_{d_3}^0, \dots, \theta_{d_n}^0$  为相应各前提库所的可信度。

其相应的模糊 Petri 网描述如图 3 和图 4。

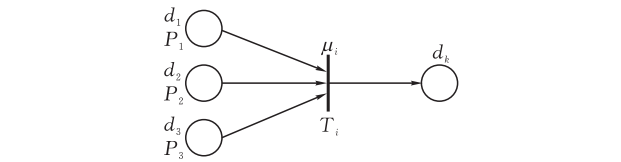


图 2 前件命题由 AND 组成的模糊 Petri 网

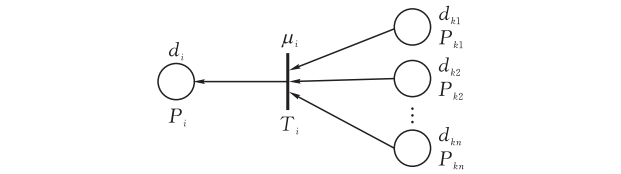


图 3 结论命题由 OR 组成的 FPN

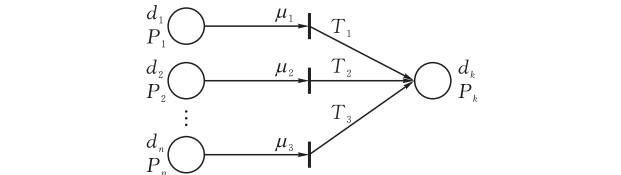


图 4 前件命题由 OR 组成的 FPN

### 2.2 船闸故障诊断系统的模糊 Petri 网建模

由矩阵及矩阵运算的方式来表达网络的结构及动态过程的变化,可通过算法产生船闸系统两个单元(电气控制单元和闸门单元)对应 Petri 网的矩阵。针对船闸控制系统建立的库所变迁含义见表 1。

表 1 库所含义	
库所	库所意义
P <sub>1</sub>	主控 cpu 损坏
P <sub>2</sub>	变频器损坏
P <sub>3</sub>	水位信息采集损坏
P <sub>4</sub>	操作按钮损坏
P <sub>5</sub>	三相交流电箱损坏
P <sub>6</sub>	减速箱损坏
P <sub>7</sub>	活动闸门损坏
P <sub>8</sub>	打开闸门
P <sub>9</sub>	状态良好
P <sub>10</sub>	状态一般
P <sub>11</sub>	状态很差

电气控制单元由库所  $P_1 - P_4$  构成,分别是 CPU、变频器、水位信息收集装置、操作按钮(图 5)。

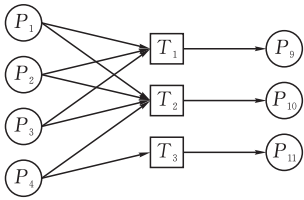


图 5 电气控制单元模糊 Petri 网建模

闸门单元由库所  $P_5 - P_8$  构成,分别是三相交流电箱、减速箱、活动闸门和开度仪(图 6)。

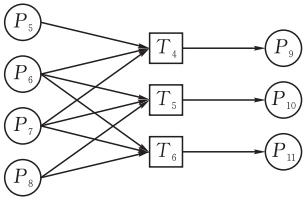


图 6 闸门单元模糊 petri 网建模

基于模糊 Petri 网知识推理的步骤如下。

1)输入由监测装置监测的信号转化来的信号,由置信度确定库所的初始状态  $\theta_0$ 。

2)由式(1)前向推理

$$\theta^{k+1} = \theta^k \oplus \{ \Gamma U \odot H [\Delta^T \odot H(\theta^k)] \}$$
 (1)

根据 Petri 网的定义,确定上述各 Petri 网模型相应的  $\Delta$ 、 $\Gamma$  及  $U$  矩阵。 $U$  中各元素的值根据 Petri 网中每组对应中故障的个数来确定,故障类型  $\mu_i$  越小则故障越少。

运用式(1)计算得到  $\theta^{k+1} = \theta^k$ ,从而推理得到结果向量  $\theta^k$ ,由结果确定故障。

3 算例分析

按照船闸安全风险评估指标体系评价,分别对主控 cpu,变频器,水位信息采集模块,操作按钮,三相交流电箱,减速箱,活动闸门,开度仪状态进行打分,扣除分数除以 100 则是归一化托肯值确定变迁触发值。根据专家打分方法,设定变迁  $t_1 - t_6$  对应的触发(表 2)。根据专家打分,判定各库所对应权重(表 3)。

表 2 变迁对应触发值			
变迁	触发值	变迁	触发值
$t_1$	0.1	$t_4$	0.2
$t_2$	0.2	$t_5$	0.1
$t_3$	0.3	$t_6$	0.1

根据模糊聚类的数据处理方法得到: $p_1 - p_8$  初始置信度为  $\theta_0 = [0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25, 0.25]^T$ 。而全关状态对于整体船闸控制系统影响趋近无穷大,则视为 10,余下只用考虑开度较大对应选项。最终得到表 4。

表 3 输入权重表

输入	权重	输入	权重	输入	权重
$p_1 \rightarrow t_1$	0.2	$p_1 \rightarrow t_2$	0.15	$p_1 \rightarrow t_3$	0
$p_2 \rightarrow t_1$	0.15	$p_2 \rightarrow t_2$	0.1	$p_2 \rightarrow t_3$	0.1
$p_3 \rightarrow t_1$	0.15	$p_3 \rightarrow t_2$	0.1	$p_3 \rightarrow t_3$	0.1
$p_4 \rightarrow t_1$	0	$p_4 \rightarrow t_2$	0.2	$p_4 \rightarrow t_3$	0.15
$p_5 \rightarrow t_4$	0.15	$p_5 \rightarrow t_5$	0.1	$p_5 \rightarrow t_6$	0.15
$p_6 \rightarrow t_4$	0.2	$p_6 \rightarrow t_5$	0.1	$p_6 \rightarrow t_6$	0.1
$p_7 \rightarrow t_4$	0.2	$p_7 \rightarrow t_5$	0.1	$p_7 \rightarrow t_6$	0.2
$p_8 \rightarrow t_4$	0.15	$p_8 \rightarrow t_5$	0.1	$p_8 \rightarrow t_6$	0.2

表 4 变迁对应置信度

变迁	对应触发置信度	变迁	对应触发置信度
$T_1$	0.0388	$T_4$	0.1025
$T_2$	0.1224	$T_5$	0.2127
$T_3$	0.2267	$T_6$	0.0795

在船闸状态评估中,输入库所对应各区域运行状态的影响因子。此处考虑主控 CPU,变频器、水位信息采集模块、操作按钮、三相交流电箱、减速箱、活动闸门、开度仪。一共 8 种影响因子,对应输入库所  $P_1 - P_8$ 。参考船闸安全风险评估指标体系中的划分方法,将船闸最终状态分为三种状态:完好状态、较好状态和注意状态,分别对应输出库所  $P_9, P_{10}, P_{11}$ 。最终确定模糊 Petri 网图形化模型。

此处取闸门单元 petri 建模进行运算

$$\Delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T$$
$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

$\theta_0 = [0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ ,取  $U = \text{diag}[0.25, 1, 0]^T$ ,最终得到  $\theta_k = [0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$ 。(k 为采样周期)即模型中各故障对应输出均为 0.并可最终确定为  $P_7$  发生故障,对应诊断结果值都较小。此外即使没有足够的结果支撑本系统也能够对相应情况进行判断,并得出较为准确的结论。

4 结论

本文针对船闸系统故障类型较多的特点,提出了基于模糊 Petri 网的船闸故障诊断模型,并结合实例对整个故障诊断系统进行了仿真诊断。仿真结果表明本故障诊断模型能够快速准确地对各种故障进行诊断,满足船闸系统的设计要求。

[参 考 文 献]

[1] 师海风.基于神经网络的北溪南港船闸故障诊断专家系统研究[M].福州:福州大学.2003.

[2] 冒刘燕.基于可靠性理论的内河船闸维修决策研巧[D].南京:东南大学.2015.

[3] 李明华,屈彦明,周孟戈,等.基于多 Agent 及 Petri 网的变压器故障诊断系统[J].西安交通大学学报,2006(02):223-227.

[4] Gong M F, Song H H, Tan J W, et al. Fault diagnosis of motor based on mutative scale back propagation net evolving fuzzy Petri nets[C].2017 IEEE. 2017: 3826-3829.

[5] 甘正佳,甘正宁,成新明.基于概率 Petri 网的柴油机故障诊断方法研究[J].长沙铁道学院学报,2003,21(1):79-83.

[6] Gao M M, Zhou M C, Huang X G, et al. Fuzzy reasoning petri nets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2003, 33(3): 314-324.

[7] Liu H C, You J X, Tian G. Determining truth degrees of input places in fuzzy petri nets[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2016, (99):1-7.

[8] Gong M, Zhang Y, Liu Y, et al. Fault diagnosis of power transformers based on back propagation algorithm evolving fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection & Control, 2015, 43(3):113-117.

[9] Basile F, Cabasino M P, Seatzu C. Marking estimation of Time Petri nets with unobservable transitions[C]//IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. 2013..

[10] Liu H C, Lin Q L, Ren M L. Fault diagnosis and cause analysis using fuzzy evidential reasoning approach and dynamic adaptive fuzzy Petri nets[J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 66(4): 899-908.

Research on Single-stage Lock Control  
System based on Fuzzy Petri Net

ZOU Qixiao<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>, JIANG Xiaotong<sup>1</sup>, LI Qingfeng<sup>2</sup>, SUN Jie<sup>2</sup>, CHEN Qiming<sup>3</sup>, ZHAO Honghong<sup>3</sup>  
(1 School of Electrical and Electronic Engin., Hubei university of technology ,Wuhan 430068, China ;  
2 China National Network Xinyuan Hydropower Co., Ltd.,  
Fuchunjiang Hydroelectric Power Plant ,Tonglu 311504, China ;  
3 Wuhan Sichuang Automatic Control Technology Co., Ltd.,Wuhan 430068, China )

**Abstract:** Lock control system is a typical distributed control system with good flexibility and coordination. However, distributed control system has hysteresis effect in diagnosis and treatment, which has a great negative effect on lock state control. Therefore, it is necessary to improve the coordination and timeliness of lock system. In this paper, Petri net with stronger reasoning power is used to model the lock system, and the state of each point can be analyzed to have a better understanding of the lock state and make the actions more targeted. The example analysis also proves that this method realizes the network data association analysis and improves the accuracy of fault diagnosis.

**Keywords:** Lock system; Distributed control; Fuzzy Petri net; Fault diagnosis

[责任编辑: 张岩芳]