

## 改进的部分可观Petri网系统在线故障诊断器设计

刘久富<sup>1†</sup>, 刘文良<sup>1</sup>, 周建勇<sup>1</sup>, 刘海阳<sup>2</sup>, 王志胜<sup>1</sup>, 刘春生<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016; 2. 东南大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 本文研究部分可观Petri网建模的离散事件系统的故障检测问题. 针对现有的部分可观Petri网系统的在线故障诊断器存在故障诊断率较低的缺陷, 本文提出了整数线性规划与广义互斥约束集成的部分可观Petri网系统在线故障诊断改进算法. 假定部分可观Petri网系统的结构与初始标识为已知, 故障被建模为不可观变迁. 首先, 算法需要观测接收事件序列, 求解部分可观Petri网的整数线性规划问题, 算法对系统的故障进行初步诊断. 初步诊断为不确定诊断的情形, 采用广义互斥约束的方法进行诊断. 最后, 通过离散事件系统实例分析, 采用本文的算法, 故障诊断率显著提高, 验证了算法的有效性.

**关键词:** 故障诊断; 部分可观Petri网; 整数线性规划; 广义互斥约束

**中图分类号:** TP391.5      **文献标识码:** A

## An improved design of online fault diagnosis for partially observed Petri net systems

LIU Jiu-fu<sup>1†</sup>, LIU Wen-liang<sup>1</sup>, ZHOU Jian-yong<sup>1</sup>,  
LIU Hai-yang<sup>2</sup>, WANG Zhi-sheng<sup>1</sup>, LIU Chun-sheng<sup>1</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu 210016, China;

2. College of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China)

**Abstract:** We study the fault diagnosis problem for discrete event systems (DES) which can be modeled by the partially observed Petri net (POPn). To overcome the low diagnosis ability of the currently POPn online fault diagnosis instruments, we propose an improved online fault diagnosis algorithm that integrates the generalized mutual exclusion constraints (GMEC) and Integer Linear Programming (ILP). We assume that the POPn structure and its initial markings are known, and the faults are modeled as unobservable transitions. First, the event sequence is observed and recorded; and then, the ILP problems of POPn are solved for primary diagnosis for the system behavior. If the results in the primary diagnosis are uncertain, we use the GMEC for a further diagnosis. A real discrete event system is taken as an example for analysis; the results show that the proposed algorithm increases the diagnosis ability remarkably and the effectiveness of the proposed algorithm is validated.

**Key words:** fault diagnosis; partially observed Petri nets; integer linear programming; generalized mutual exclusion constraints (GMEC)

### 1 引言(Introduction)

自动在线故障检测与诊断技术<sup>[1]</sup>是近年深受关注的研究领域之一. 故障分析包含监控系统行为、判断任意故障的发生并辨识相应的类型或者源头. 常规的故障检测与诊断方法主要包含基于解析模型<sup>[2]</sup>、基于信号处理<sup>[3]</sup>和基于知识<sup>[4]</sup>三大类别.

Petri网(Petri net, PN)作为一个网系统, 具有直观的图形表示和严密的数学基础双重特性, 常被广泛应用于离散事件系统中. 基于Petri网的离散事件系统(discrete event system, DES)故障检测与诊断技术<sup>[5-9]</sup>

研究成果当前主要包括解释诊断器、编译诊断器、PN架构中在线故障检测策略、G-标识法、基础可达图法等算法的提出. 不同算法, 其适用条件也不一定相同, 同时也有各自的优缺点.

解释诊断器<sup>[6,10]</sup>计算量大, 不需要计算状态空间, 存储器需求小, 可用于计算在线故障或故障状态; 编译诊断器<sup>[11-12]</sup>需要收集系统可能发生的故障集或系统可能到达的故障状态, 建立编译诊断器需要很大计算量的同时也需要大量的存储器, 诊断器可离线运行但会导致很大的状态空间; PN架构中在线故障检测

收稿日期: 2014-08-31; 录用日期: 2015-04-02.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: liujiufu2@126.com; Tel.: +86 13813989877.

国家自然科学基金项目(61473144)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61473144).

策略<sup>[13-14]</sup>可避免当系统框架变化的时候重新设计和重新定义诊断器的工作; 基础可达图法<sup>[15-17]</sup>采用 $j$ 向量与基础可达图来对离散事件系统进行在线故障检测与诊断, 特别适合有界Petri网且每个变迁由不同标签标记.

Dotoli等<sup>[18]</sup>人提出的Petri网框架下基于整数线性规划的DES在线故障诊断算法优点在于它具有较低的计算复杂度, 能避免状态爆炸问题, 且建立的诊断器为解释诊断器, 不需要离线计算. 其算法对离散事件系统行为进行在线故障诊断, 诊断结果分为无故障、故障已发生和故障可能已发生这三种情形. 对于故障可能已发生的情形, Dotoli等人并未作更详细的说明与讨论, 这正是Dotoli等人提出的在线故障检测与诊断算法的不足之处.

本文针对文献[18]所提出算法在进行故障诊断时出现的故障可能已经发生的诊断结果作了深入研究, 主要采用广义互斥约束(generalized mutual exclusion constraint, GMEC)来对该诊断结果作进一步研究, 以期能对系统行为作出更明确的诊断, 进而实现系统可诊断性的提高.

## 2 广义互斥约束与系统故障行为描述 (Preliminaries of GMEC and description of the system fault behavior)

### 2.1 Petri网与广义互斥约束(Petri nets and GMEC)

**定义 1** 部分可观Petri网(partially observed Petri net, POPN)定义为一个6元数组  $PN = (P, T_o, T_u; \mathbf{Pre}, \mathbf{Post}, M_0)$ , 且  $T = T_o \cup T_u$ . 其中:  $P$  是维数为  $m$  的库所集,  $T$  是维数为  $n$  的变迁集,  $T_o$  表示可观变迁集,  $T_u$  表示不可观变迁集,  $|T_u| = n_u \leq n$ . 定义矩阵  $C = \mathbf{Post} - \mathbf{Pre}$  为  $PN$  的关联矩阵, 其维数为  $m \times n$ ,  $M_0$  为  $PN$  的初始标识.

记库所  $p$  的标识为  $M(p)$ , 变迁  $t_j \in T$  在标识  $M$  处使能的充要条件为: 对任意  $p \in \cdot t_j$  (其中  $\cdot t$  为  $t$  的前置集:  $\cdot t = \{p \in P : \mathbf{Pre}(p, t) > 0\}$ ) 都有

$$M(p) \geq \mathbf{Pre}(p, t_j). \quad (1)$$

假设  $t_j \in T$  在标识  $M$  处使能后得到新的标识为  $M'$ , 记为  $M[t_j]M'$ , 则  $M' = M + C \cdot \vec{t}_j$ , 称为该  $PN$  的状态方程, 其中  $\vec{t}_j$  为与规范基向量相对应的  $n$  维点火向量.

一个部分可观Petri网中若不存在有向的循环, 则称该网为非周期的.

**定理 1**<sup>[6]</sup> 已知一个  $PN = \langle PN, M_0 \rangle$ , 且该  $PN$  系统为非周期网. 当且仅当存在一个非负整数解  $\sigma$  满足  $M = M_0 + C \cdot \sigma$  时, 则有  $M \in R(PN, M_0)$ . 其中  $R(PN, M_0) = \{M | \exists \sigma : M_0[\sigma]M\}$ , 为该  $PN$  系统的可达集.

**定义 2** 给定系统  $PN = (P, T, \mathbf{Pre}, \mathbf{Post})$  及一个不可观变迁子集  $T_u \subseteq T$ , 网  $PN$  上的  $T_u$ -诱导子网(记作:  $PN_u \prec_{T_u} PN$ ) 定义为由  $PN$  去掉  $T \setminus T_u$  中所有变迁之后得到的四元数组  $PN_u = (P_u, T_u; \mathbf{Pre}_u, \mathbf{Post}_u)$ ,  $C_u = \mathbf{Post}_u - \mathbf{Pre}_u$  为关联矩阵  $C = \mathbf{Post} - \mathbf{Pre}$  对于  $T_u$  的限制.

**定义 3** 给定系统 POPN, 称函数  $\lambda : T \rightarrow E \cup \{\varepsilon\}$  为其变迁标记函数, 该函数分配到每个变迁  $t \in T$  的结果要么是  $e_i \in E$  要么为空串  $\varepsilon$ . 若  $t \in T_u$ , 则  $\lambda(t) = \varepsilon$ ; 若  $t \in T_o$ , 则  $\lambda(t) \neq \varepsilon$ .

假设相同的标记  $e_i \in E$  至多只能与一个变迁相关. 因此受限于  $T_o$  的标记函数是非周期并且可以被假设为  $E = T_o$ .

广义互斥约束方法是离散事件系统监督控制理论<sup>[19]</sup>中的一种重要控制需求, 很多其他形式的控制要求也可以转化为广义互斥约束<sup>[20-21]</sup>问题.

**定义 4** 已知Petri网  $PN = \langle PN, M_0 \rangle$ , 定义一个二元组  $(l, k)$  为该  $PN$  的广义互斥约束, 其中  $l \in N^m$ ,  $m$  为  $PN$  中库所的数目,  $k \in N$  为常数. 对系统资源定义了一个可容许性区域  $\mathcal{M}(l, k) = \{M \in N^m | l^T M \leq k\}$ , 其中  $l$  为库所到非负整数集上的映射, 即  $l : P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ ,  $k$  为系统资源上界.

广义互斥约束集合  $(L, k)$  定义了一个可容许性区域  $\mathcal{M}(L, k) = \bigcap_{i=1}^{n_c} \mathcal{M}(l_i, k_i)$ , 其中:  $L = [l_1^T \ l_2^T \ \dots \ l_{n_c}^T]^T$ ,  $k = [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_{n_c}]^T$ .

约束规约的更通用形式为GMEC的析取形式<sup>[22]</sup>. 设  $\{(L_j, k_j), j = 1, \dots, n_p\}$  为GMEC集合, 那么该GMEC集合的析取可容许性区域可以被定义为  $\bigcup_{j=1}^{n_p} \mathcal{M}(L_j, k_j)$ . 这样的非线性集合包括对所有至少有个  $j$  满足  $L_j m \leq k_j$  的标识  $m$ .

### 2.2 系统故障行为描述(Descriptions of system fault behavior)

记  $T_f = \{\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_F\} \subseteq T_u$  为与故障相关的不可观变迁集 ( $F$  为其维数,  $|T_f| = n_f \leq n_u$ ), 记  $T_{nf} = \{\tau_{F+1}, \tau_{F+2}, \dots, \tau_{F+K}\} \subseteq T_u$  为与故障不相关的不可观变迁集,  $T_u = T_f \cup T_{nf}$ ,  $K$  为与故障不相关的不可观变迁集维数.

系统可能发生的故障集记为  $\Delta f = \{f_1, f_2, \dots, f_F\}$ , 任意故障  $f_i \in \Delta f$  均由一个不可观故障变迁  $\tau_i \in T_f$  模型化, 并随着相应故障变迁  $\tau_i \in T_f$  的发生而发生 ( $i \in \{1, 2, \dots, F\}$ ).

记  $w$  为与序列  $\sigma \in T^*$  相关事件的观测字, 其中  $w = \lambda(\sigma)$ , 并且使用变迁标记函数的扩展形式  $\lambda : T^* \rightarrow E^*$ , 若  $\sigma = t_{b_1} t_{b_2} \dots t_{b_k}$ , 则有  $\lambda(\sigma) = \lambda(t_{b_1}) \lambda(t_{b_2}) \dots \lambda(t_{b_k})$ , 且  $|\sigma| \geq |w|$ . 若序列  $\sigma$  中包含  $q$  个被  $\varepsilon$  标记的变

迁, 则 $|\sigma| = q + |w|$ . 此外, 记 $\sigma_u \in \sigma(\sigma_o \in \sigma)$ 为 $\sigma$ 由不可观(可观)变迁及相应发生向量 $\vec{\sigma}_u : T_u \rightarrow N^{K+F}$  ( $\vec{\sigma}_o : T_o \rightarrow N^O$ )组成的子序列. 类似地, 记 $\sigma_f(\sigma_{nf}) \in \sigma_u$ 为 $\sigma_u$ 由故障(非故障)变迁集及对应的发生向量 $\vec{\sigma}_f(\vec{\sigma}_{nf})$ 组成的子序列. 假设 $E = T_o$ , 则 $w = \lambda(\sigma_o)$ . 点火向量可记为

$$\vec{\sigma} = \begin{bmatrix} \vec{\sigma}_o \\ \vec{\sigma}_u \end{bmatrix}.$$

**定义 5** 给定POPN系统初始标识 $M_0 \in N^m$ 及满足 $M_0[\sigma_o]$ 的可观变迁序列 $\sigma_o$ , 则定义 $\sigma_o$ 在 $M_0$ 处的解释集为 $\sum(M_0, \sigma_o) = \{\sigma \in T^* | M_0[\sigma_o], \sigma_o \in \sigma\}$ .

定义 $\sigma_o$ 在 $M_0$ 处包含故障 $f_k$ 的解释集为

$$\sum(M_0, \sigma_o, f_k) = \{\sigma \in \sum(M_0, \sigma_o) | \tau_k \in \sigma\}.$$

### 3 基于广义互斥约束的在线故障诊断方法 (Approach of online fault diagnosis based on GMEC)

#### 3.1 POPN模型假设与诊断器函数 (Assumptions for POPN model and definitions of diagnoser)

本文研究的改进的基于GMEC的部分可观Petri网故障诊断器主要用来判断Petri网中每个被观测离散事件的系统行为是否出现了某个故障.

首先对下文所提出的故障检测与诊断算法适用条件作如下假设:

H1) 系统可由网 $PN = (P, T; \mathbf{Pre}, \mathbf{Post})$ 模型化, 并且初始标识 $M_0$ 已知.

H2)  $T_o = E$ 中与变迁点火相关的标记是可观的.

H3)  $PN$ 系统 $PN_u \prec_{T_u} PN$ 为非循环的.

条件H1)和H2)是显示系统知识水平的假设, H3)是基于 $PN$ 模型的故障检测领域中共同采用的假设: 不可观变迁的循环是不容许的.

故障诊断器的输入为POPN的初始标识 $M_0$ 及系统行为观测字 $w \in L$ ,  $L$ 为DES语言. 假设 $w = \lambda(\sigma)$ , 记 $\sigma = \sigma_{u_1} t_{\alpha_1} \sigma_{u_2} t_{\alpha_2} \cdots \sigma_{u_h} t_{\alpha_h}$  ( $h \geq 1$ )为与 $w$ 对应变迁序列. 其中,  $\sigma_o = t_{\alpha_1} t_{\alpha_2} \cdots t_{\alpha_h} = w$ 为 $\sigma$ 的可观子序列 ( $t_{\alpha_i} \in T_o, i = 1, 2, \cdots, h$ ), 序列 $\sigma_{u_i} \in T_u^*$ 为在变迁 $t_{\alpha_i}$ 之前而在变迁 $t_{\alpha_{i-1}}$  ( $i = 2, \cdots, h$ )之后发生的不可观变迁序列.

**定义 6** 将故障诊断器定义为函数 $\Phi : N^m \times T_o^* \rightarrow \Delta f \cup \{N\}$ ,  $\Phi$ 与每个初始标识 $M_0 \in N^m$ 相关且对于每个观测字 $w \in T_o^*$ 设置如下:

1)  $\Phi(M_0, w) = \{f_k \in \Delta f | \sum(M_0, \sigma_o, f_k) = \emptyset = \{N\}\}$ , 在 $w$ 中由于不存在包含与观测器一致的变迁 $\tau_k \in T_f$ 的点火序列, 系统行为为无故障.

2)  $\Phi(M_0, w) = \{f_k \in \Delta f | \sum(M_0, \sigma_o, f_k) \neq \emptyset, \text{且} \sigma_o = w\}$ , 系统行为在观测字 $w$ 中发生故障. 在这种

情形下故障诊断器提供可能包含在与观测字相一致的序列中的故障 $f_k \in \Delta f$ .

3)  $\Phi(M_0, w) = \{f_k \in \Delta f | \sum(M_0, \sigma_o, f_k) \neq \emptyset, \text{且} \sigma_o = w\} \cup \{N\}$ , 系统的行为可能有故障, 也可能故障 $f_k \in \Delta f$ 在 $w$ 中未发生.

当 $\Phi(M_0, w) = \{f_k \in \Delta f | \sum(M_0, \sigma_o, f_k) \neq \emptyset, \text{且} \sigma_o = w\} \cup \{N\}$ 时, 使用GMEC集合 $(L, k)$ 来对系统行为进一步诊断. 设 $\tau_\theta$ 模型化故障 $f_k$ , 广义互斥约束集合 $(L, k)$ 设置如下:

$$m(p_i) + m(p_j) \leq k, \quad (2)$$

其中:  $p_i \in ((\cdot \tau_\theta) \cdot)^*$ ,  $p_j \in \cdot \tau_\theta, k \in \mathbb{N}$ , 系统不满足式(2)时, 故障变迁 $\tau_\theta$ 被点火, 系统行为故障.

#### 3.2 故障诊断方法 (Approach of online fault diagnosis)

根据整数线性规划和广义互斥约束的定义及Petri网线性表示关系, 本文提出了离散事件系统在Petri网框架下基于广义互斥约束与整数线性规划的在线故障检测与诊断算法. 该算法适应于由 $L$ 语言描述, 由 $PN = (P, T_o, T_u; \mathbf{Pre}, \mathbf{Post})$ 模型化的离散事件系统, 且满足条件H1)–H3).

在线工作的故障诊断器 $\Phi$ 的程序中, 对于每个初始标识 $M_0 \in N^m$ , 在被 $w \in L$ 的点火处, 定理2给出了每个在 $M_0$ 处的发生与被观测序列 $\sigma_o = w$ 相一致的序列 $\sigma \in T^*$ 的线性代数特征. 该定理允许笔者去证实诊断器并将系统的行为特征为无故障、故障、可能有故障这3种状态.

**定理 2**<sup>[18]</sup> 已知DES由语言 $L$ 描述, 并由 $PN$ 系统 $\langle PN, M_0 \rangle$ 模型化, 且 $PN$ 满足条件H1)–H3). 当且仅当存在 $h$ 个点火向量 $\vec{\sigma}_{u_1}, \cdots, \vec{\sigma}_{u_i}, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}$ 满足下列线性约束:

$$\xi(w, M_0, \mathbf{Post}, \mathbf{Pre}) = \begin{cases} \vec{\sigma}_{u_i} \in N^{F+K}, i = 1, 2, \cdots, h, \\ C_u \sum_{i=1}^k \vec{\sigma}_{u_i} \geq \mathbf{Pre} \vec{t}_{\alpha_k} - M_0 - C \sum_{i=1}^{k-1} \vec{t}_{\alpha_i}, \\ k = 1, 2, \cdots, h, \end{cases} \quad (3)$$

则给定的一个观测字 $w \in L (w = \sigma_o = t_{\alpha_1} t_{\alpha_2} \cdots t_{\alpha_h})$ 及一个点火序列 $\sigma = \sigma_{u_1} t_{\alpha_1} \cdots \sigma_{u_h} t_{\alpha_h} (|\sigma_{u_i}| \geq 0, i = 1, 2, \cdots, h)$ 满足 $\sigma \in \sum(M_0, \sigma_o)$ .

**定理 3** 已知 $PN = \langle PN, M_0 \rangle$ 满足条件H1)–H3)及 $\xi(w, M_0, \mathbf{Post}, \mathbf{Pre})$ . 给定观测器 $w \in L (w = \sigma_o = t_{\alpha_1} t_{\alpha_2} \cdots t_{\alpha_h})$ , 定义如下ILPP1:

$$\min \varphi(\vec{\sigma}_{u_1}, \vec{\sigma}_{u_2}, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}) = \sum_{i=1}^h \vec{\sigma}_{u_i}(\tau_\theta). \quad (4)$$

对于 $\tau_\theta \in T_f$ , 若ILPP1有解 $\vec{\sigma}_{u_1}^*, \vec{\sigma}_{u_2}^*, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}^*$ 且 $\varphi^{\min}(\vec{\sigma}_{u_1}, \vec{\sigma}_{u_2}, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}) = \varphi^{\min} > 0$ , 则有 $\sigma = \sigma_{u_1} t_{\alpha_1}$

$\cdots \sigma_{u_h} t_{\alpha_h} \in \sum(M_0, \sigma_0, f_k)$ , 则系统行为故障.

**证** 假设向量  $\vec{\sigma}_{u_1}^*, \vec{\sigma}_{u_2}^*, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}^*$  为 ILPP1 的一个解, 且  $\varphi^{\min}(\vec{\sigma}_{u_1}, \vec{\sigma}_{u_2}, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}) = \varphi^{\min} > 0$ . 因此, 笔者推断出对于一些  $i \in \{1, \cdots, h\}$  都有  $\vec{\sigma}_{u_i}(\tau_\theta) \geq 1$ . 由定理2知存在序列  $\sigma = \sigma_{u_1} t_{\alpha_1} \cdots \sigma_{u_h} t_{\alpha_h}$  满足  $\sigma \in \sum(M_0, \sigma_0)$ , 而且  $\tau_\theta \in \sigma_{u_i} \in \sigma$ . 因此,  $\sigma = \sigma_{u_1} t_{\alpha_1} \cdots \sigma_{u_h} t_{\alpha_h} \in \sum(M_0, \sigma_0, f_\theta)$ , 由定义6知该系统行为故障.

**定理 4** 已知  $PN = \langle PN, M_0 \rangle$  满足条件 H1)–H3) 及  $\xi(w, M_0, \mathbf{Post}, \mathbf{Pre})$ . 给定观测字  $w \in L$  ( $w = \sigma_o = t_{\alpha_1} t_{\alpha_2} \cdots t_{\alpha_n}$ ), 定义如下 ILPP2:

$$\max \varphi(\vec{\sigma}_{u_1}, \vec{\sigma}_{u_2}, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}) = \sum_{i=1}^h \vec{\sigma}_{u_i}(\tau_\theta). \quad (5)$$

对于  $\tau_\theta \in T_f$ , 若 ILPP2 有解  $\vec{\sigma}_{u_1}^*, \vec{\sigma}_{u_2}^*, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}^*$ , 并且  $\varphi^{\max}(\vec{\sigma}_{u_1}, \vec{\sigma}_{u_2}, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}) = \varphi^{\max} = 0$ , 则 DES 行为在观测器  $w$  中无故障.

**证** 假设对每个  $f_\theta \in \Delta f$ , ILPP2 的解  $\vec{\sigma}_{u_1}^*, \vec{\sigma}_{u_2}^*, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}^*$  满足  $\varphi^{\max}(\vec{\sigma}_{u_1}, \vec{\sigma}_{u_2}, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}) = \varphi^{\max} = 0$ , 此时有两种情形可能发生:

a) 对每个  $f_\theta \in \Delta f$ , ILPP2 的解  $\vec{\sigma}_{u_i}^* = 0$  ( $i = 1, 2, \cdots, h$ ), 即不存在与观测字一致并包含变迁  $\tau_k \in T_f$  的点火序列. 因此,  $\sum(M_0, \sigma_0) = \emptyset$ , 此时系统行为在观察字  $w$  中无故障;

b) 对一些  $f_\theta \in \Delta f$ , ILPP2 的解  $\vec{\sigma}_{u_i}^* \neq 0$  ( $i \in \{1, 2, \cdots, h\}$ ) 且  $\sum(M_0, \sigma_0) = \emptyset$ . 由于  $\varphi^{\max}(\vec{\sigma}_{u_1}, \vec{\sigma}_{u_2}, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}) = \varphi^{\max} = 0$ , 进而对每个  $\sigma_{u_i} \in \sigma \in \sum(M_0, \sigma_0)$  都有  $\sigma_{u_i} \in T_{nf}^*$ . 因此, 系统行为无故障.

由 a)–b) 知  $\varphi^{\max} = 0$  时, 系统行为无故障.

**定理 5** 对于  $\tau_\theta \in T_f$ , 若  $\varphi^{\max} > 0$  且  $\varphi^{\min} = 0$ , 则系统行为可能有故障.

**证** 当  $\varphi^{\max} > 0$  且  $\varphi^{\min} = 0$  时, 由定理2知存在一个满足  $M_0[\sigma_{u_1} t_{\alpha_1}] M_1 \cdots M_{h-1}[\sigma_{u_h} t_{\alpha_h}] M_h$  的序列  $\sigma = \sigma_{u_1} t_{\alpha_1} \cdots \sigma_{u_h} t_{\alpha_h} \in \sum(M_0, \sigma_0)$ , 其中  $\vec{\sigma}_{u_i}(\tau_\theta) = 0$  ( $i = 1, \cdots, h$ ); 同时存在一个满足

$$M_0[\sigma_{u_1} t_{\alpha_1}] M_1 \cdots M_{h-1}[\sigma_{u_h} t_{\alpha_h}] M_h$$

的序列  $\sigma = \sigma_{u_1} t_{\alpha_1} \cdots \sigma_{u_h} t_{\alpha_h} \in \sum(M_0, \sigma_0, f_\theta)$ , 其中  $\vec{\sigma}_{u_i}(\tau_\theta) \neq 0$  ( $i = 1, \cdots, h$ ). 因此, 系统行为在  $M_0$  下  $w$  的发生中可能有故障.

#### 4 基于 GMEC 和 ILP 的在线故障诊断算法 (Algorithm of online fault diagnosis based on GMEC and ILP)

根据 Petri 网理论、DES 的 Petri 网模型特征、广义互斥约束定义及整数线性规划理论, 提出了如下所示的改进的基于 GMEC 和 ILP 的 POPN 系统在线故障诊断器算法, 算法适用于满足条件 H1)–H3), 且可由语

言  $L$  描述由  $\langle PN, M_0 \rangle$  模型化的 DES.

输入:  $M_0$ ,

$$PN = (P, T, \mathbf{Pre}, \mathbf{Post}), \lambda, T_o, T_u, T_f, T_{nf}.$$

输出:  $\Phi$

1. 初始化算法变量.

$$w = \varepsilon, h = 0, \vec{\sigma}_o \in N^o, \vec{\sigma} = \vec{0}.$$

2. 记录事件.

等待, 直到新事件  $e$  被观测

$$e =: \lambda(t), w = wt, h = h + 1,$$

$$\phi(M_0, w) = \emptyset, \vec{\sigma}_o(t) = \vec{\sigma}_o(t) + 1, \vec{\varphi}_1^{\max} =: \vec{0}.$$

3. 求解 ILPP.

For  $\theta = 1$  to  $F$

$$\begin{cases} z_1 = \max \varphi_1(\vec{\sigma}_{u_1}, \vec{\sigma}_{u_2}, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}), \\ z_2 = \min \varphi_1(\vec{\sigma}_{u_1}, \vec{\sigma}_{u_2}, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h}), \\ \text{s.t. } \xi(w, M_0, \mathbf{Post}, \mathbf{Pre}). \end{cases}$$

4. 诊断结果判断.

if  $z_1 = 0$

// 系统行为无故障

then set  $\phi(M_0, w) = N$ ;

else if  $z_2 > 0$

// 系统故障已发生

then set  $\phi(M_0, w) = \phi(M_0, w) \cup \{f_\theta\}$ ;

else if  $z_1 > 0 \ \& \ z_2 = 0$  // 系统故障可能已发生

{

for  $p_i \in ((\cdot \tau_\theta) \cdot)^*$ ,  $p_j \in \cdot \tau_\theta$ ,  $k \in \mathbb{N}$ ,

if  $m(p_i) + m(p_j) > k$  // 不满足 GMECs

then set  $\phi(M_0, w) = \phi(M_0, w) \cup \{f_{\text{GMEC}}\}$ ;

else set  $\phi(M_0, w) = \phi(M_0, w) \cup \{N\}$

}

5. Go to 2.

**步骤 1** 确认算法输入为 POPN 模型的初始标识  $M_0$ ,  $PN$  结构  $PN = (P, T; \mathbf{Pre}, \mathbf{Post})$  及 DES 的可观测事件, 并将  $PN$  结构中变迁划分为  $T = T_o \cup T_u$ ,  $T_u = T_f \cup T_{nf}$ , 确定变迁标记函数  $\lambda$ .

初始化算法中变量  $w, h, \vec{\sigma}_o$ .

**步骤 2** 记录事件并等待新事件  $e$  被观测. 若  $w$  ( $|w| = h$ ) 已被观测, 则通过标记函数  $\lambda$  得到  $w = \lambda(\sigma)$  且  $\sigma_o = t_{\alpha_1} t_{\alpha_2} \cdots t_{\alpha_n} = w \in \sigma$  (其中  $t_{\alpha_i} \in T_o$ ,  $i = 1, 2, \cdots, h$ ). 此外, 定义一个维数为  $F$  的向量  $\vec{\varphi}^{\max}$ , 对于任意  $f_\theta \in \Delta f$ ,  $\vec{\varphi}^{\max}$  致力于存储 ILPP2 这个目标函数的最大值.

**步骤 3** 求解 ILPP1 和 ILPP2, 即在约束条件  $\xi(w, M_0, \mathbf{Post}, \mathbf{Pre})$  下求得目标函数  $z_1 = \max \varphi(\vec{\sigma}_{u_1}, \vec{\sigma}_{u_2}, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h})$ ,  $z_2 = \min \varphi(\vec{\sigma}_{u_1}, \vec{\sigma}_{u_2}, \cdots, \vec{\sigma}_{u_h})$  的最优解.

**步骤4** 根据步骤3中求得的解来诊断系统行为是否出现故障。

1) 若对于  $f_\theta$ , ILPP2有解  $\bar{\sigma}_{u_1}^*, \bar{\sigma}_{u_2}^*, \dots, \bar{\sigma}_{u_h}^*$ , 且  $z_1 = \max \varphi(\bar{\sigma}_{u_1}, \bar{\sigma}_{u_2}, \dots, \bar{\sigma}_{u_h}) = \varphi^{\max} = 0$ , 则该系统行为是无故障的, 算法设置  $\Phi(M_0, w) = \{N\}$ .

2) 若对于  $f_\theta$ , ILPP1有解  $\bar{\sigma}_{u_1}^*, \bar{\sigma}_{u_2}^*, \dots, \bar{\sigma}_{u_h}^*$ , 且  $z_2 = \min \varphi(\bar{\sigma}_{u_1}, \bar{\sigma}_{u_2}, \dots, \bar{\sigma}_{u_h}) = \varphi^{\min} > 0$ , 系统行为发生故障, 算法设置  $\Phi(M_0, w) = \Phi(M_0, w) \cup \{f_\theta\}$ .

3) 若对于  $f_\theta$ ,  $z_1 > 0$  且  $z_2 = 0$ , 则检验系统资源是否满足式(2)设置的GMEC. 若满足, 则系统行为可能有故障, 算法设置  $\Phi(M_0, w) = \Phi(M_0, w) \cup \{N\}$ . 反之, 系统行为故障, 算法设置  $\Phi(M_0, w) = \Phi(M_0, w) \cup \{f_{GMEC}\}$ .

**步骤5** 返回记录事件, 算法跳至步骤2进行循环计算, 直至没有新的事件被观测.

**5 本文算法与文献[18]中算法的比较(Comparison between the proposed algorithm and the algorithm in [18])**

本文提出改进的基于GMEC的部分可观Petri网在线故障诊断器同文献[18]提出的在Petri网框架下基于整数线性规划的在线故障诊断器相比, 本文添加了广义互斥约束集合  $(L, k)$  对系统资源进行约束, 对文献[18]中诊断结果为可能有故障的情形根据广义互斥约束条件进一步确认故障变迁是否被点火, 即对可能有故障的诊断结果进行进一步确诊, 以期提高系统的可诊断性.

为了便于分析改进的算法优势, 笔者分别提出如下可诊断性指标和不可诊断性指标.

**定义7** 可诊断性定义为

$$\text{diag}(\sigma, t_f) = \frac{|\Sigma_1(m, t)| + |\Sigma_2(m, t)|}{|\Sigma(m, t)|} \times 100\%, \quad (6)$$

其中  $\text{diag}(\sigma, t_f)$  为可诊断性,  $|\Sigma(m, t)|$  为可观变迁序列总数,  $|\Sigma_1(m, t)|$  为被诊断系统出现故障的可观变迁序列数,  $|\Sigma_2(m, t)|$  为被诊断系统无故障的可观变迁序列数.

**定义8** 不可诊断性定义为

$$\text{non\_diag}(\sigma, t_f) = \frac{|\Sigma_3(m, t)|}{|\Sigma(m, t)|} \times 100\% = 1 - \text{diag}(\sigma, t_f), \quad (7)$$

其中  $|\Sigma_3(m, t)|$  为被诊断系统可能有故障的可观变迁序列数.

使用GMEC对系统资源进行约束, 保证系统对资源的最大与最小需求量、系统各部分在资源竞争中无饥饿问题及对系统资源的占用的公平性. 当系统不满足GMEC时, 系统必然会出现故障.

当初步诊断结果为可能有故障时, 根据GMEC对

系统进一步确诊. 广义互斥约束的设置, 有效地提高了系统的可诊断性.

**6 实例分析与验证(Case study)**

**6.1 DES的POPN建模(DES modeled with POPN)**

已知DES的部分可观Petri网模型如图1所示, 系统初始标识  $M_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ , 假设该模型的可观变迁集  $T_o = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$ , 其不可观变迁集  $T_u = \{\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6\}$ , 变迁  $\tau_5, \tau_6$  分别模型化系统故障  $f_1, f_2$ , 且该DES的POPN模型中所有变迁都是可控的,  $w = t_1 t_3 t_1 t_2 t_4 t_1 t_2 t_1 t_3 t_4 t_1 t_3 t_1 t_4$  为系统观测字.

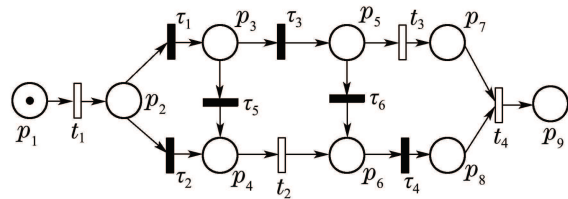


图1 DES的POPN模型

Fig. 1 The POPN model of a DES

根据定义2求得图1所示系统POPN模型的不可观诱导子网  $PN_u \prec_{T_u} PN$ , 如图2所示.

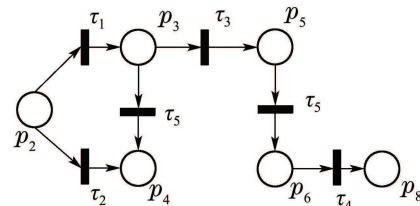


图2 POPN模型的  $T_u$ -诱导子网

Fig. 2 The  $T_u$ -induced subnet of POPN model

由图2知, 该POPN模型  $T_u$ -诱导子网为非周期的, 满足假设条件H1)–H3), 同时满足本文算法和文献[18]中算法的使用条件, 且两种算法的输入相同.

对于本文图1所示在线故障诊断器算法, 为实现DES资源管理, 笔者设置该DES的GMEC为  $m_3 + m_5 \leq 1$ , 即  $L = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ ,  $k = [1]$ .

下面分别使用文献[18]和本文提出的算法对图1所示的部分可观Petri网系统进行在线故障诊断.

**6.2 文献[18]中在线故障诊断结果(On-line fault diagnosed result in [18])**

当图1所示系统未使用广义互斥约束来对该系统资源进行约束时, 该DES的POPN模型在观测字  $w = t_1 t_3 t_1 t_2 t_4 t_1 t_2 t_1 t_3 t_4 t_1 t_3 t_1 t_4$  下使用文献[18]中基于整数线性规划的在线故障诊断算法过程进行运算得到如表1所示的在线故障诊断器诊断结果.

诊断结果表明该系统由于不存在包含与观测器一致的故障变迁  $\tau_k \in T_f$  的点火序列, 因此, 在前3个事件被观测的过程中系统行为无故障.

当新事件记录到观测字  $w = t_1 t_3 t_1 t_2$  时, 若点火序列  $\sigma = t_1 \tau_1 \tau_3 t_3 t_1 \tau_1 \tau_5 t_2$  被使能, 则由于观测字  $w$  提供的最小解释集中包含  $\tau_5$ , 因此算法诊断器决断出故障  $f_1$  已发生; 若点火序列  $\sigma = t_1 \tau_1 \tau_3 t_3 t_1 \tau_2 t_2$  被使能, 则不存在包含与观测器一致的故障变迁  $\tau_k \in T_f$ , 此时系统行为无故障; 因此,  $w = t_1 t_3 t_1 t_2$  诊断结果为系统行为可能有故障. 观测字  $w$  的子观测字  $w' = t_1 t_3 t_1 t_4$ , 点火序列只可能是  $\sigma = t_1 \tau_1 \tau_3 t_3 t_1 \tau_6 \tau_4 t_4$ , 此时子观测字  $w'$  提供的最小解释中包含  $\tau_6$ , 算法诊断器诊断出故障  $f_2$  已发生, 因此

$w = t_1 t_3 t_1 t_2 t_4 t_1 t_2 t_1 t_3 t_4 t_1 t_3 t_1 t_4$

时系统行为故障.

### 6.3 本文算法故障诊断结果(Fault diagnosis result by the proposed algorithm)

使用改进的在线故障诊断算法进行在线故障诊断, 故障诊断结果见表1, 该系统由于不存在包含与观测器一致的故障变迁  $\tau_k \in T_f$  的点火序列, 因此, 在前6个事件被观测的过程中系统行为无故障.

表 1 文献[18]中算法与本文算法故障诊断结果

Table 1 Fault diagnosis results with the algorithm in [18] and the proposed algorithm

| 序号 | 观测字 $w$   | $\varphi^{\max}$ | $\varphi^{\min}$ | 文献[18]算法             |      | 本文算法           |      |
|----|---|------------------|------------------|----------------------|------|----------------|------|
|    |   |                  |                  | $\Phi(M_0, w)$       | 诊断结果 | $\Phi(M_0, w)$ | 诊断结果 |
| 1  | $t_1$   | 0                | 0                | $\{N\}$              | 无故障  | $\{N\}$        | 无故障  |
| 2  | $t_1 t_3$   | 0                | 0                | $\{N\}$              | 无故障  | $\{N\}$        | 无故障  |
| 3  | $t_1 t_3 t_1$   | 0                | 0                | $\{N\}$              | 无故障  | $\{N\}$        | 无故障  |
| 4  | $t_1 t_3 t_1 t_2$   | 0                | 0                | $\{f_1\} \cup \{N\}$ | 可能故障 | $\{N\}$        | 无故障  |
| 5  | $t_1 t_3 t_1 t_2 t_4$                                     | 0                | 0                | $\{f_1\} \cup \{N\}$ | 可能故障 | $\{N\}$        | 无故障  |
| 6  | $t_1 t_3 t_1 t_2 t_4 t_1$                                 | 0                | 0                | $\{f_1\} \cup \{N\}$ | 可能故障 | $\{N\}$        | 无故障  |
| 7  | $t_1 t_3 t_1 t_2 t_4 t_1 t_2$                             | 1                | 1                | $\{f_1\} \cup \{N\}$ | 可能故障 | $\{f_1\}$      | 故障   |
| 8  | $t_1 t_3 t_1 t_2 t_4 t_1 t_2 t_1$                         | 1                | 1                | $\{f_1\} \cup \{N\}$ | 可能故障 | $\{f_1\}$      | 故障   |
| 9  | $t_1 t_3 t_1 t_2 t_4 t_1 t_2 t_1 t_3$                     | 1                | 1                | $\{f_1\} \cup \{N\}$ | 可能故障 | $\{f_1\}$      | 故障   |
| 10 | $t_1 t_3 t_1 t_2 t_4 t_1 t_2 t_1 t_3 t_4$                 | 1                | 1                | $\{f_1\} \cup \{N\}$ | 可能故障 | $\{f_1\}$      | 故障   |
| 11 | $t_1 t_3 t_1 t_2 t_4 t_1 t_2 t_1 t_3 t_4 t_1$             | 1                | 1                | $\{f_1\} \cup \{N\}$ | 可能故障 | $\{f_1\}$      | 故障   |
| 12 | $t_1 t_3 t_1 t_2 t_4 t_1 t_2 t_1 t_3 t_4 t_1 t_3$         | 1                | 1                | $\{f_1\} \cup \{N\}$ | 可能故障 | $\{f_1\}$      | 故障   |
| 13 | $t_1 t_3 t_1 t_2 t_4 t_1 t_2 t_1 t_3 t_4 t_1 t_3 t_1$     | 1                | 1                | $\{f_1\} \cup \{N\}$ | 可能故障 | $\{f_1\}$      | 故障   |
| 14 | $t_1 t_3 t_1 t_2 t_4 t_1 t_2 t_1 t_3 t_4 t_1 t_3 t_1 t_4$ | 2                | 2                | $\{f_2\}$            | 故障   | $\{f_1, f_2\}$ | 故障   |

由  $m_3 + m_5 \leq 1$  可知  $m_3 = 0$  或  $m_3 = 1$ . 观测字为  $w = t_1 t_3 t_1 t_2$  时, 若  $m_3 = 0$ , 即库所  $p_3$  中不包含 token, 点火序列  $\sigma = t_1 \tau_1 \tau_3 t_3 t_1 \tau_2 t_2$  被点火, 此时不存在包含与观测器一致的故障变迁  $\tau_k \in T_f$ , 因此系统行为无故障; 若  $m_3 = 1$ , 即库所  $p_3$  中含一个 token,  $t_2$  点火之前变迁  $\tau_5$  必点火, 因此  $m_3 = 1$  时观测字  $w = t_1 t_3 t_1 t_2$  对应点火序列  $\sigma = t_1 \tau_1 \tau_3 t_3 t_1 \tau_1 \tau_5 t_2$  被使能, 观测字  $w$  提供的最小解释集中包含  $\tau_5$ , 算法诊断器决断出故障  $f_1$  已发生.

子观测字  $w'_1 = t_1 t_3 t_1 t_2 t_4$  诊断结果为无故障, 而子观测字  $w'_2 = t_1 t_2 t_1 t_3 t_4$  诊断结果为故障, 这是对库所  $P_3$  中资源实时监督而得出的诊断结果.

综上, 广义约束条件  $m_3 + m_5 \leq 1$  的使用使得系统行为的可能有故障的情形得到确切诊断, 提高了系统的可诊断性.

### 6.4 两种算法运行结果比较(Comparison with the proposed algorithm and the algorithm in [18])

表2为本文算法与文献[18]的算法可诊断性比较结果. 表2中, 系统被观测接收14条变迁序列, 应用

文献[18]中的算法, 诊断出系统有1条已发生故障的可观变迁序列、3条无故障的可观变迁序列. 同时诊断出有10条可观变迁序列为不确定诊断状态. 笔者可以计算出, 可诊断性为28.6%, 不可诊断性为71.4%. 表2中:

$$\mathcal{A} = \text{diag}(\sigma, t_f), \mathcal{B} = \text{non\_diag}(\sigma, t_f).$$

表 2 文献[18]与本文算法诊断结果可诊断性比较  
Table 2 Diagnosability comparison with algorithm in [18] and the proposed algorithm

| 算法     | $ \Sigma_1(m, t) $ | $ \Sigma_2(m, t) $ | $ \Sigma_3(m, t) $ | $\mathcal{A}$ | $\mathcal{B}$ |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------|---------------|
| 文献[18] | 1                  | 3                  | 10                 | 28.6%         | 71.4%         |
| 本文     | 8                  | 6                  | 0                  | 100%          | 0             |

应用改进的算法, 诊断出系统有已发生故障的变迁序列数为8, 无故障可观变迁数为6. 笔者可以计算出, 可诊断性为100%, 不可诊断性为0.

本文算法的可诊断性高于算法[18]的可诊断性, 广义互斥约束集合的添加, 有效的提高了系统的可诊断性.

## 7 结论(Conclusion)

针对现有的部分可观Petri网系统的在线故障诊断器存在故障诊断率较低的缺陷, 本文提出了整数线性规划与广义互斥约束集成的部分可观Petri网系统在线故障诊断改进算法. 假定部分可观Petri网系统的结构与初始标识为已知, 故障被建模为不可观变迁. 通过观测接收事件序列, 求解部分可观Petri网的整数线性规划问题, 算法对系统的故障进行初步诊断. 初步诊断为不确定诊断的情形, 采用广义互斥约束的方法进行诊断. 从而, 算法的故障诊断率得以提高.

GEMC作为DES监督控制要求, 将系统资源约束问题转化为GMEC问题, 对系统资源进行实时监督与约束, 能有效地提高系统的可诊断性.

通过离散事件系统实例分析, 采用本文的算法, 故障诊断率显著提高, 验证了算法的有效性.

未来研究工作中, 笔者将对算法的计算效率开展研究, ILP问题的复杂性依赖于变量的数目, 需要在存储器中存储大量不可观诱导子网. 算法的计算复杂性需要降低, 计算效率需要提高.

## 参考文献(References):

- [1] 周东华, 胡艳艳. 动态系统的故障诊断技术 [J]. 自动化学报, 2009, 35(6): 748 – 758.  
(ZHOU Donghua, HU Yanyan. Fault diagnosis techniques for dynamic systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(6): 748 – 758.)
- [2] SUN R, LIU S, ZHANG Y F. Design of fault diagnosis observer for a class of nonlinear systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(11): 1462 – 1466.
- [3] 李晗, 萧德云. 基于数据驱动的故障诊断方法综述 [J]. 控制与决策, 2011, 26(1): 1 – 10.  
(LI Han, XIAO Deyun. Survey on data driven fault diagnosis methods [J]. *Control and Decision*, 2011, 26(1): 1 – 10.)
- [4] WANG Y Y, LI Q J, CHANG M, et al. Research on fault diagnosis expert system based on the neural network and the fault tree technology [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 31(1): 1206 – 1210.
- [5] LEFEBVRE D, DELHERM C. Diagnosis of DES with Petri net models [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2007, 4(1): 114 – 118
- [6] RAMIREZ T A, RUIZ B E, RIVERA R I, et al. Online fault diagnosis of discrete event systems: a Petri net based approach [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2007, 4(1): 31 – 39.
- [7] 孙蓉, 刘胜, 张玉芳. 一类非线性系统故障诊断观测器设计 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(11): 1462 – 1466.  
(SUN Rong, LIU Sheng, ZHANG Yufang. Design of fault diagnosis observer for a class of nonlinear systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(11): 1462 – 1466.)
- [8] 李娟, 周东华, 司小胜, 等. 微小故障诊断方法综述 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(12): 1517 – 1529.  
(LI Juan, ZHOU Donghua, SI Xiaosheng, et al. Review of incipient fault diagnosis methods [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(12): 1517 – 1529.)
- [9] 罗继亮, 吴维敏, 董利达, 等. 一类离散事件系统的监控器综合 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(4): 621 – 624.  
(LUO Jiliang, WU Weimin, DONG Lida, et al. Supervisory synthesis for a class of discrete event systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(4): 621 – 624.)
- [10] YANG X, CHEN L J. Design and fault diagnosis of Petri Net controllers for Petri Nets with uncontrollable and unobservable transitions [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2009, 28(1): 17 – 22.
- [11] CABASINO M P, GIUA A, POCCI M. Discrete event diagnosis using labeled Petri Nets-An application to manufacturing systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2011, 19(9): 989 – 1001.
- [12] FANTI M P, MANGINI A M, UKOVICH W. Fault detection by labeled Petri nets in centralized and distributed approaches [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(2): 392 – 404.
- [13] BASILE F, CHIACCHIO P, TOMMASI G D. An efficient approach for online diagnosis of discrete event systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(4): 748 – 759.
- [14] BASILE F, CHIACCHIO P, TOMMASI G D. On  $K$ -diagnosability of Petri nets via integer linear programming [J]. *Automatica*, 2012, 48(9): 2047 – 2058.
- [15] CABASINO M P, GIUA A, SEATZU C. Fault detection for discrete event systems using Petri Nets with unobservable transitions [J]. *Automatica*, 2010, 46(9): 1531 – 1539.
- [16] CABASINO M P, GIUA A, LAFORTUNE S, et al. A new approach for diagnosability analysis of Petri nets using verifier nets [J]. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 2012, 57(12): 3104 – 3117.
- [17] LEFEBVRE D. Online fault diagnosis with partially observed Petri nets [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2014, 59(7): 1919 – 1924.
- [18] DOTOLI M, FANTI M P, MANGINI A M, et al. On-line fault detection in discrete event system by Petri Nets and integer linear programming [J]. *Automatica*, 2009, 45(11): 2665 – 2672.
- [19] 戴学丰. 基于神经网络算法的实时DES监督控制 [J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 708 – 711.  
(DAI Xuefeng. Supervisory control of real time DES based on neural networks algorithm [J]. *Control Theory & Applications*, 1997, 14(4): 708 – 711.)
- [20] BASILE F, CHIACCHIO P, GIUA A. An optimization approach to Petri net monitor design [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(2): 306 – 311.
- [21] BASILE F, RECALDE L. Closed-loop live marked graphs under generalized mutual exclusion constraint enforcement [J]. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2009, 19(1): 1 – 30.
- [22] BASILE F, CORDONE R, PIRODDI L. Integrated design of optimal supervisors for the enforcement of static and behavioral specifications in Petri net models [J]. *Automatica*, 2013, 49(11): 3432 – 3439.

## 作者简介:

**刘久富** (1970–), 男, 博士, 硕士研究生导师, 目前研究方向为离散事件动态系统、故障检测与诊断、人工智能应用与实现等, E-mail: liujiufu2@126.com;

**刘文良** (1988–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为计算机应用、嵌入式软件测试、故障检测与诊断, E-mail: automatic3.cn@163.com;

**王建勇** (1990–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为嵌入式系统开发、非线性系统, E-mail: 278502685@qq.com;

**刘海阳** (1992–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为计算机应用理论、离散事件动态系统, E-mail: HYLi-u-seu1992@163.com;

**王志胜** (1970–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为信息融合控制、故障诊断技术等, E-mail: wangzhisheng@nuaa.edu.cn;

**刘春生** (1955–), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为故障检测与诊断、非线性系统智能控制, E-mail: liuchsh@nuaa.edu.cn.