# 基于Petri网诊断器的离散事件系统模式故障的在线诊断

阙蔡雄[1], 刘富春[1†], 赵 锐[1], 邓秀勤[2], 崔洪刚[1,3]

(1. 广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510006; 2. 广东工业大学 应用数学学院, 广东 广州 510006;

3. 东源县科技创新中心, 广东 河源 517500)

**摘要**: 本文研究基于Petri网诊断器的离散事件系统模式故障的在线诊断问题. 先构建一种用于模式故障在线诊断的自动机, 给出了基于这种自动机的在线诊断方法. 然后将自动机转换为Petri网并进一步构造了可用于S型模式故障或T型模式故障在线诊断的Petri网诊断器, 提出了基于Petri网诊断器的模式故障在线诊断算法. 通过分析算法的复杂性, 得到了该算法具有多项式空间复杂性的结论.

**关键词**: 故障诊断; 离散事件系统; Petri网; 在线诊断; 多项式复杂性

**引用格式**: 阙蔡雄, 刘富春, 赵锐, 等. 基于Petri网诊断器的离散事件系统模式故障的在线诊断. 控制理论与应用, 2020, 37(7): 1621 – 1627

DOI: 10.7641/CTA.2020.90427

# On-line pattern diagnosis of discrete event systems with Petri net diagnosers

QUE Cai-xiong[1], LIU Fu-chun[1†], ZHAO Rui[1], DENG Xiu-qin[2], CUI Hong-gang[1,3]

(1. School of Computers, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China;
2. School of Applied Mathematics, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong 510006, China;
3. Science and Technology Innovation Center of Dongyuan, Heyuan Guangdong 517500, China)

**Abstract:** This paper studies the online diagnosis of patterns fault of DESs with Petri net diagnoser. Firstly, an automaton for online diagnosis of patterns are constructed, and the corresponding online diagnostic method based on this automaton is given. Then the automaton is converted into Petri net and a Petri net diagnoser for S-type or T-type pattern online diagnosis is constructed. The online pattern diagnosis algorithm based on Petri net diagnoser is proposed. By analyzing the complexity of the algorithm, the conclusion that the algorithm has the spatial complexity of polynomial is obtained.

**Key words:** fault diagnosis; discrete event system; Petri net; online diagnosis; polynomial complexity

**Citation:** QUE Caixiong, LIU Fuchun, ZHAO Rui, et al. On-line pattern diagnosis of discrete event systems with Petri net diagnosers. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(7): 1621 – 1627

## 1 引言

近年来, 离散事件系统的故障诊断成为一个热门的研究领域, 备受国内外专家学者的关注. Sampath等提出了一种故障诊断方法[1], 是目前离散事件系统故障诊断研究中最为广泛使用的方法. 在文献[1]中, 离散事件系统被建模为一个有限状态自动机, 其故障诊断的目的在于当系统发生故障之后, 在一定的延迟之内将其检测出并加以隔离. 文献[2]将故障诊断方法由集中式系统推广至分布系统, 提出一种分布式离散事件系统的故障诊断方法. 文献[3]提出了一种异步诊断方法, 允许诊断器与系统不在同一时刻初始化. 文献[4]针对随机离散事件系统提出了一种稳健诊断方法, 它允许系统的实际模型是不确定模型. 文献[5] 提出了一种双模糊离散事件系统, 并基于该框架研究了基于状态的分布式诊断问题. 本文作者也对离散事件系统的故障诊断问题及与之密切相关的不透明性问题进行了相关研究, 提出一种随机离散事件系统的安全诊断方法[6]和一种不完备系统当前状态不透明性的验

收稿日期: 2019−06−06; 录用日期: 2020−02−17.
†通信作者. E-mail: fliu2011@163.com.
本文责任编委: 赵千川.
国家自然科学基金项目(61673122), 广东省自然科学基金项目(2019A1515010548), 广东工业大学计算机学院重大奖项培育项目(2016PY01), 广东省信息物理融合系统重点实验室项目(2016B030301008)资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China (61673122), the Natural Science Foundation of Guangdong Province (2019A 1515010548), the Major Awards Incubation Project of School of Computers of GDUT (2016PY01) and the Opening Project of Guangdong Province Key Laboratory of Cyber-Physical System (2016B030301008).

证算法[7].

上述文献考虑的均为对单个故障事件的诊断, 然而在许多应用中, 例如网络入侵探测, 需要诊断的往往是一连串事件(称为一个模式). Genc等[8]和Jeron等[9]提出了模式诊断的概念和相应算法. Genc等提出了两种模式故障类型: S型模式故障和T型模式故障, 其中S型模式故障考虑的是在语言中以子序列的形式发生的故障, 而T型模式故障考虑的是在语言中以子串的形式发生的故障. Jeron等提出了监督模式的概念, 一个监督模式指的是一个自动机, 其标记的语言是需要诊断的模式的集合. 本文作者也对模式故障诊断进行了研究, 考虑了基于模式的安全故障诊断问题[10]和模糊离散事件系统的模式故障诊断问题[11].

离散事件系统的故障诊断问题又可以分为离线诊断和在线诊断. 关于在线诊断, 文献[1]给出的在线诊断方法不需要储存整个诊断器而只需储存诊断器的当前状态, 但具体算法没有给出. 文献[2]提出了一种在多项式的时间内即可得出诊断结果的在线诊断算法. 文献[12]提出一种针对随机离散事件系统在线诊断方法. 文献[13]构造了一种Petri网诊断器对离散系统进行在线诊断, 这种Petri网诊断器可在多项式时间内构造完成, 而且可以方便地应用于可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC). 文献[14]研究了离散事件系统的主动诊断问题, 研究了一种$N$–可诊断性.

值得指出的是, 近年来以Petri网为诊断器模型的故障诊断方法也引起了国内外的重视. 文献[15]提出一种基于Petri网的在线诊断算法, 该算法使用基于$g$-标记的线性编程方法来对故障事件进行在线诊断, 避免了预先的离线计算. 文献[16]提出一种基于网展开的在线诊断算法, 有效地控制了状态爆炸问题, 但这种方法也导致其在线诊断过程需进行大量的计算. 文献[17]研究了以部分可观Petri网为模型的离散事件系统的在线诊断问题, 提出一种整合广义互斥约束和整数线性编程的在线故障诊断算法. Gougam等[18]研究了基于Petri 网模型的离散事件系统模式故障诊断问题. 文献[19]将模式故障诊断推广到了随机Petri网模型. 文献[20]研究了定时系统中的模式诊断问题.

据大家所知, 目前尚无用于模式故障的基于Petri网诊断器的在线诊断方法. 本文继续了作者在文献[10–11]的工作, 提出了一种用于模式故障的基于Petri网诊断器的在线诊断方法. 首先讨论了离散事件系统的模式故障在线诊断问题, 提出了自动机$G_{\rm D}$来对离散事件系统进行在线诊断. 然后在$G_{\rm D}$的基础上, 提出了Petri网诊断器的构造算法及在线诊断算法. 本文将故障在线诊断问题推广至模式故障, 得益于Petri网的分布性质(distributed nature), 有效的避免了文献[1]中出现的状态爆炸问题, 亦避免了使用诸如文献[16]的网展开方法, 减少了诊断过程中的计算. 本文提出的Petri网诊断器具有多项式时间的空间复杂度, 具有所需空间小、效率高等特点.

本文接下来分为4节: 第2节将介绍离散事件系统和Petri网的一些相关知识; 第3节研究模式故障的在线诊断问题, 提出一种用于S型模式故障诊断和T型模式故障诊断的有限状态自动机$G_{\rm D}$; 第4节提出基于Petri网诊断器的模式故障在线诊断的验证算法并给出复杂度分析; 第5节总结本文工作.

## 2 自动机与Petri网

一个确定型有限自动机为$G=(X,\Sigma,\delta,x_0,X_m)$, 其中: $X$为有限状态空间, $\Sigma$为事件集, $\delta$为转移函数, $x_0$为初始状态. 事件集$\Sigma$可划分为两个不相交的集合$\Sigma_{\rm o}$和$\Sigma_{\rm uo}$, 其中: $\Sigma_{\rm o}$ 表示可观事件集, $\Sigma_{\rm uo}$表示不可观事件集. $X_m$为标记状态集.

为方便起见, 引入以下符号: $\|\omega\|$表示事件串$\omega$的长度, $\sigma\in\omega$表示$\sigma$至少在$\omega$中出现了一次, $\omega_{\rm f}$表示事件串的最后一个事件, $s\in_S\omega$表示$s$为$\omega$的子序列, 记号$\tau\in_T\omega$表示$\tau$为$\omega$的子串. 投影$\mathcal{P}:\Sigma^*\to\Sigma_{\rm o}^*$是指一个满足如下规则的映射: 对于任意$\sigma\in\Sigma$, 如果$\sigma\in\Sigma_{\rm o}$, 则$\mathcal{P}(\sigma)=\sigma$, 否则$\mathcal{P}(\sigma)=\varepsilon$, 且$\mathcal{P}(\omega\sigma)=\mathcal{P}(\omega)\mathcal{P}(\sigma)$.

集 合$\Psi(\Sigma_\theta)=\{\omega\in L:\exists\sigma\in\Sigma_\theta,\omega_{\rm f}=\sigma\}$, 即$L$中以$\Sigma_\theta$中任一事件结尾的串的集合. 集合

$$L_{\Sigma_\theta}=\{\omega\in L:\exists\omega\in\Sigma_\theta,\sigma\in\omega\},$$

即$L$中包含集合$\Sigma_\theta$中任一事件的串的集合. 模式故障串组成的集合记为$K$,

$$S=\{\omega\in L:\exists u\in K,u\in_S\omega\},$$
$$T=\{\omega\in L:\exists u\in K,u\in_T\omega\},$$

即$S$和$T$分别表示$L$中包含S型模式故障和T型模式故障的串的集合. 集合

$$\Psi_{\rm S}(K)=\{\omega\in S:\exists u\in K,u\in_S\omega\wedge\omega_{\rm f}=u_{\rm f}\},$$
$$\Psi_{\rm T}(K)=\{\omega\in T:\exists u\in K,u\in_T\omega\wedge\omega_{\rm f}=u_{\rm f}\},$$

即$\Psi_{\rm S}(K)$和$\Psi_{\rm T}(K)$分别表示恰好发生S型模式故障和T 型模式故障的串的集合.

记号$\delta(x,\sigma)!$表示转移$\delta(x,\sigma)$在$G$中有定义. 有效事件函数$\Gamma:X\to2^\Sigma$定义为$\Gamma(x)=\{\sigma:\delta(x,\sigma)!\}$. 对于任意$x\in X$,

$$UR(x)=\{x'\in X:\exists\omega\in\Sigma_{\rm uo}^*,\delta(x,\omega)=x'\}.$$

两个自动机$G_1$和$G_2$的并是一个自动机, 其生成和标记的语言分别为

$$L(G_1\cup G_2)=L(G_1)\cup L(G_2),$$
$$L_m(G_1\cup G_2)=L_m(G_1)\cup L_m(G_2).$$

一个标签Petri网是一个七元组

$$\mathcal{N}=(P,T,{\rm Pre},{\rm Post},M_0,\Sigma,l),$$

其中: $P$是库所的有限集, $T$是变迁的有限集, $\mathrm{Pre}(P \times T) \to \{0,1,2,\cdots\}$是连接库所和变迁的有向弧函数, $\mathrm{Post}:(T \times P) \to \{0,1,2,\cdots\}$是连接变迁和库所的有向弧函数, $M_0: P \to \{0,1,2,\cdots\}$是初始标识函数, $l: T \to 2^{\Sigma}$为标签分配函数. 库所$p_i$含有的令牌数量表示为$M(p_i)$. 标识

$$\vec{M} = [M(p_1)\ \ M(p_2)\ \ \cdots\ \ M(p_n)]^t,$$

记事件串发生后Petri网到达的标识为$\vec{M}_{\mathrm{u}}$. 对于任意的变迁$t_i$, 其输入库所集为

$$I(t_i) = \{p_i \in P : \mathrm{Pre}(p_i, t_i) > 0\},$$

输出库所集为$O(t_i) = \{p_i \in P : \mathrm{Post}(t_i, p_i) > 0\}$. 类似地,

$$I(p_i) = \{t_i \in T : \mathrm{Post}(t_i, p_i) > 0\},$$
$$O(p_i) = \{t_i \in T : \mathrm{Pre}(p_i, t_i) > 0\}.$$

## 3　模式故障的在线诊断

文献[8]给出了一种模式故障的离线诊断方法, 在本节中作者将提出一种在线诊断方法, 其主要思路如下: 假设观察到的系统历史运行路径为$\omega$(已发生的事件串), 在每次观察到新事件$\sigma$发生后, 计算出系统可能的实际运行路径$\Delta = \{\mathcal{P}^{-1}(\omega\sigma) \bigcap L(G)\}$. 若$\Delta$中所有的串都不包含故障, 那么可以判定系统没有发生故障; 若$\Delta$中既有包含故障的串, 也有不包含故障的串, 那么不能确定系统是否发生了故障; 若$\Delta$中所有的串都包含故障, 则可以判定系统发生了故障. 用符号$N$表示系统没有发生故障, $A$表示不确定系统是否发生了故障, $F$表示确定系统发生了故障, 则以上诊断过程可定义为函数diag.

**定义 1**　$\mathrm{diag}: \Sigma_{\mathrm{o}}^* \to \{N, A, F\}$为一个满足如下规则的函数: 对于任意$\omega\sigma \in \Sigma_{\mathrm{o}}^*$,

$$\mathrm{diag}\{\omega\sigma\} = \begin{cases} N, & \mathcal{P}^{-1}(\omega\sigma) \cap S = \varnothing, \\ A, & \mathcal{P}^{-1}(\omega\sigma) \cap S \neq \varnothing \wedge \mathcal{P}^{-1}(\omega\sigma) \nsubseteq S, \\ F, & \mathcal{P}^{-1}(\omega\sigma) \subseteq S. \end{cases} \tag{1}$$

为方便起见, 引入模式故障串标记自动机.

**定义 2**　给定一个模式故障串$k_i \in K$及其模式故障类型, 定义模式故障串标记自动机

$$H(k_i) = (X_i, \Sigma, \delta_i, x_0^i, X_m^i),$$

其中: $X_i = \{0,1,2,\cdots,\|k_i\|\}$, $x_0^i = 0$, $X_m^i = \{\|k_i\|\}$. 对于任意的$x \in X_i$和$\sigma \in \Sigma$, 当$k_i$为S型故障时,

$$\delta_i(x,\sigma) = \begin{cases} \|k_i\|, & x = \|k_i\|, \\ x+1, & \sigma = \sigma_{x+1} \wedge x \leqslant m-1, \\ x, & \text{其余情况}; \end{cases} \tag{2}$$

当$k_i$为T型故障时,

$$\delta_i(x,\sigma) = \begin{cases} \|k_i\|, & x = \|k_i\|, \\ x+1, & \sigma = \sigma_{x+1} \wedge x \leqslant m-1, \\ \max(\Theta(x,\sigma)), & \sigma \neq \sigma_{x+1} \wedge \Theta(x,\sigma) \neq \varnothing, \\ 0, & \text{其余情况}. \end{cases} \tag{3}$$

定义2中的$\Theta$函数用来匹配当前已发生的串与模式串$k_i$, 其具体的算法可使用克努特–莫里斯–普拉特操作(Knuth-Morris-Pratt, KMP)算法.

**定义 3**　给定一个离散事件系统

$$G = (X, \Sigma, \delta, x_0, X_m)$$

和一个模式故障集$K$, 令

$$G' = (X', \Sigma, \delta', x_0', X_m') = \boldsymbol{U}_{k_i \in K}(G \times H(k_i)),$$

则$G_{\mathrm{D}}$定义为

$$G_{\mathrm{D}} = (X_{\mathrm{D}}, \Sigma_{\mathrm{o}}, \delta_{\mathrm{D}}, x_{0,\mathrm{D}}, X_{m,\mathrm{D}}),$$

其中: $X_{\mathrm{D}} = X'$, $X_{m,\mathrm{D}} = X_m'$, $x_{0,\mathrm{D}} = UR(x_0')$, 对于$\sigma \in \Sigma_{\mathrm{o}}$以及$x_{\mathrm{D}} \in X_{\mathrm{D}}$,

$$\delta_{\mathrm{D}}(x_{\mathrm{D}}, \sigma) = \{x_{\mathrm{D}}' \in X_{\mathrm{D}} | \exists \omega \in \sigma\Sigma_{\mathrm{uo}}^* : \delta'(x_{\mathrm{D}}, \omega) = x_{\mathrm{D}}'\}. \tag{4}$$

**定理 1**　给定一个离散事件系统$G$, 一个模式故障集$K$及其模式故障类型, 记$L(G) = L$,

$$G' = (X', \Sigma, \delta', x_0', X_m') = \boldsymbol{U}_{k_i \in K}(G \times H(k_i)).$$

对于任意的$u \in \mathcal{P}(L)$:

1) $\mathrm{diag}\{u\} = N$当且仅当

$$\delta_{\mathrm{D}}(x_{0,\mathrm{D}}, u) \cap X_{m,\mathrm{D}} = \varnothing;$$

2) $\mathrm{diag}\{u\} = A$当且仅当

$$\delta_{\mathrm{D}}(x_{0,\mathrm{D}}, u) \cap X_{m,\mathrm{D}} \neq \varnothing \wedge \delta_{\mathrm{D}}(x_{0,\mathrm{D}}, u) \nsubseteq X_{m,\mathrm{D}};$$

3) $\mathrm{diag}\{u\} = F$当且仅当$\delta_{\mathrm{D}}(x_{0,\mathrm{D}}, u) \subseteq X_{m,\mathrm{D}}$.

**证**　假设模式故障类型为S型(T型模式故障可完全类似证明).

1) 情况1:

$$\mathrm{diag}\{u\} = N \Leftrightarrow \mathcal{P}^{-1}(u) \cap S = \varnothing \Leftrightarrow \forall \omega \in \mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\omega \notin S \Leftrightarrow \forall \omega \in \mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\forall k_i \in K,\ k_i \notin_S \omega \Leftrightarrow \forall \omega \in \mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\forall k_i \in K,\ \omega \notin L_m(H(k_i)) \Leftrightarrow \forall \omega \in \mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\omega \notin L_m(G') \Leftrightarrow \forall \omega \in \mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\delta'(x_0', \omega) \notin X_m' \Leftrightarrow \forall \omega \in \mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\forall x_{0,\mathrm{D}}' \in x_{0,\mathrm{D}},\ \forall \sigma \in \Sigma_{\mathrm{uo}}^*,$$
$$(\delta'(x_0', \sigma) = x_{0,\mathrm{D}}' \Longrightarrow \delta'(x_{0,\mathrm{D}'}', \omega/\sigma) \notin X_m') \Leftrightarrow$$
$$\forall x_{0,\mathrm{D}}' \in x_{0,\mathrm{D}},$$
$$\delta_{\mathrm{D}}(x_{0,\mathrm{D}}', u) \cap X_{m,\mathrm{D}} = \varnothing \Leftrightarrow$$

$\delta_{\mathrm{D}}(x_{0,\mathrm{D}},u)\cap X_{m,\mathrm{D}}=\varnothing$;

2) 情况2:

$$\mathrm{diag}\{u\}=A\Leftrightarrow\mathcal{P}^{-1}(u)\cap S\neq\varnothing\wedge\mathcal{P}^{-1}(u)\nsubseteq S\Leftrightarrow\exists\omega_1\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\omega_1\in S\wedge\exists\omega_2\in\mathcal{P}^{-1}(u),\ \omega_2\notin S\Leftrightarrow\exists\omega_1\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\exists k_i\in K,\ k_i\in_S\omega_1\wedge\exists\omega_2\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\forall k_i\in K,\ k_i\notin_S\omega_2\Leftrightarrow\exists\omega_1\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\exists k_i\in K,\ \omega_1\in L_m(H(k_i))\wedge\exists\omega_2\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\forall k_i\in K,\ \omega_2\notin L_m(H(k_i))\Leftrightarrow\exists\omega_1\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\omega_1\in L_m(G')\wedge\exists\omega_2\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\omega_2\notin L_m(G')\Leftrightarrow\exists\omega_1\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\delta'(x_0',\omega_1)\in X_m'\wedge\exists\omega_2\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\delta'(x_0',\omega_2)\notin X_m'\Leftrightarrow\delta_{\mathrm{D}}(x_{0,\mathrm{D}},u)\cap X_{m,\mathrm{D}}\neq\varnothing\wedge\delta_{\mathrm{D}}(x_{0,\mathrm{D}},u)\nsubseteq X_{m,\mathrm{D}};$$

3) 情况3:

$$\mathrm{diag}\{u\}=F\Leftrightarrow\mathcal{P}^{-1}(u)\cap S\subseteq S\Leftrightarrow\forall\omega\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\omega\in S\Leftrightarrow\forall\omega\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\exists k_i\in K,\ k_i\in_S\omega\Leftrightarrow\forall\omega\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\exists k_i\in K,\ \omega\in L_m(H(k_i))\Leftrightarrow\forall\omega\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\omega\in L_m(G')\Leftrightarrow\forall\omega\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\delta'(x_0',\omega)\in X_m'\Leftrightarrow\forall\omega\in\mathcal{P}^{-1}(u),$$
$$\forall x_{0,\mathrm{D}}'\in x_{0,\mathrm{D}},\ \forall\sigma\in\Sigma_{\mathrm{uo}}^*,$$
$$\left(\delta'(x_0',\sigma)=x_{0,\mathrm{D}}'\Rightarrow\delta'(x_{0,\mathrm{D}}',\omega/\sigma)\in X_m'\right)\Leftrightarrow$$
$$\forall x_{0,\mathrm{D}}'\in x_{0,\mathrm{D}},$$
$$\delta_{\mathrm{D}}(x_{0,\mathrm{D}}',u)\subseteq X_{m,\mathrm{D}}\Leftrightarrow\delta_{\mathrm{D}}(x_{0,\mathrm{D}},u)\subseteq X_{m,\mathrm{D}}.$$

证毕.

下面通过一个例子来说明如何根据$G_{\mathrm{D}}$和定理1对离散事件系统S型模式故障进行在线诊断, T型模式故障在线诊断方法可类似得到.

**例 1** 如图1所示, 设系统$G$生成的语言为$L$, 可观事件集为$\Sigma_{\mathrm{o}}=\{c,d,e\}$, 不可观事件集为$\Sigma_{\mathrm{uo}}=\{a,b\}$, 故障模式集为$K=\{ac,bd\}$, $G$关于$L$是S型模式故障可诊断的. 根据定义2构造$H(ac)$, $H(bd)$如图2–3所示, 根据定义3构造$G'$, $G_{\mathrm{D}}$如图4–5所示. 现在根据定理1用$G_{\mathrm{D}}$对系统进行在线诊断: 假设历史运行路径$\omega=cec$, 当观察到事件$\sigma=d$, 可计算出$\delta_{\mathrm{D}}(0,cecd)=\{11,12\}$, 而$\{11,12\}\cap X_{m,\mathrm{D}}=\{11\}$且$\{11,12\}\nsubseteq X_{m,\mathrm{D}}$, 根据定理1, 此时不能确定系统是否发生故障. 同理, 当继续观察到事件$d$后, 计算出$\delta_{\mathrm{D}}(0,cecdd)=\{11\}$, 而$\{11\}\subseteq X_{m,D}$, 根据定理1, 可以确定系统发生了故障, 诊断结束. 其余路径的诊断过程相同.

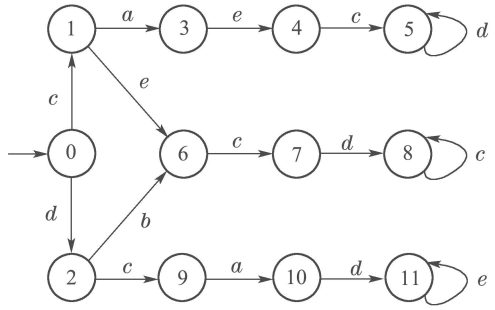

图1 一个离散事件系统$G$

Fig. 1 A discrete-event system $G$

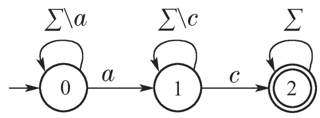

图2 自动机$H(ac)$

Fig. 2 Automation $H(ac)$

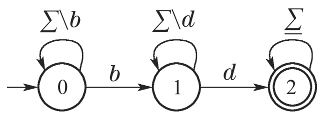

图3 自动机$H(bd)$

Fig. 3 Automation $H(bd)$

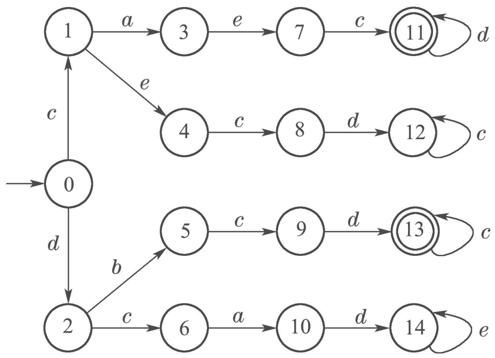

图4 自动机$G'$

Fig. 4 Automation $G'$

## 4 基于Petri网诊断器的模式故障在线诊断的验证算法

为验证定理1中的条件, 下面提出构建Petri网诊断器$\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$的方法(算法1)并给出基于Petri网诊断器的模式故障在线诊断的验证算法(算法2).

**算法 1** 构造Petri网诊断器$\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$.

输入: $G,K$.

输出: $\mathcal{N}_{\mathrm{D}}=(P_{\mathrm{D}}\cup\{N,F\},T_{\mathrm{D}}\cup\{t_{\mathrm{f}}\},\mathrm{Pre}_{\mathrm{D}},\mathrm{Post}_{\mathrm{D}},M_{0,\mathrm{D}},\Sigma_{\mathrm{o}},l_{\mathrm{D}},In_{\mathrm{D}})$.

**步骤 1** 根据定义3构造$G_{\mathrm{D}}$.

**步骤 2** 将$G_{\mathrm{D}}$转换为Petri网.

**步骤 2.1** 对于每个状态$x_i\in X_{\mathrm{D}}$, 创建一个对应的库所$p_i\in P_{\mathrm{D}}$.

**步骤 2.2** 对于每个库所 $p_i \in P_{\rm D}$, 若对应的状态 $x_i$ 有 $\delta_{\rm D}(x_i,\sigma)$, 则创建一个变迁 $t_j \in T_{\rm D}$ 并分配标签 $l_{\rm D}(t_j)=\{\sigma\}$, 令 ${\rm Pre}_{\rm D}(p_i,t_j)=1$. 对于所有的 $x_l \in \delta_{\rm D}(x_i,\sigma)$, 令 ${\rm Post}_{\rm D}(t_j,p_l)=1$.

**步骤 2.3** 对于所有 $p_i \in P_{\rm D}$, 若对应的状态 $x_i \in x_{0,{\rm D}}$, 则令 $M_{0,{\rm D}}(p_i)=1$, 否则 $M_{0,{\rm D}}(p_i)=0$.

**步骤 3** 构造 $\mathcal{N}_{\rm D}$.

**步骤 3.1** 对于每个库所 $p_i \in P_{\rm D}$, 若对应的状态 $x_i \in X_{\rm D}$ 有 $\Gamma(x_i)\cap\Sigma_{\rm o}\neq\Sigma_{\rm o}$, 则创建一个变迁 $t'_j \in T'$. 令 $l_{\rm D}(t'_j)=\Sigma_{\rm o}\backslash\Gamma(x_i)$, ${\rm Pre}_{\rm D}(p_i,t'_j)=1$.

**步骤 3.2** 创建一个变迁 $t_{\rm f}$, 创建库所 $N$ 和 $F$. 令 $l_{\rm D}(t_{\rm f})=\{\lambda\}$, ${\rm Pre}_{\rm D}(N,t_{\rm f})={\rm Post}_{\rm D}(t_{\rm f},F)=1$.

**步骤 3.3** 对于所有 $p_i \in P_{\rm D}$, 若对应的状态 $x_i \in X_{\rm D}\backslash X_{m,{\rm D}}$, 则令 ${\rm In}_{\rm D}(p_i,t_{\rm f})=1$, 否则令 ${\rm In}_{\rm D}(p_i,t_{\rm f})=0$.

**步骤 3.4** 令

$$T_{\rm D}=T_{\rm D}\cup T',\ M_{0,{\rm D}}(N)=1,\ M_{0,{\rm D}}(F)=0.$$

**步骤 3.5** 所有未定义的 ${\rm Pre}_{\rm D}(p,t)$, ${\rm Post}_{\rm D}(t,p)$, 令 ${\rm Pre}_{\rm D}(p,t)=0$, ${\rm Post}_{\rm D}(t,p)=0$.

**步骤 4** 算法结束.

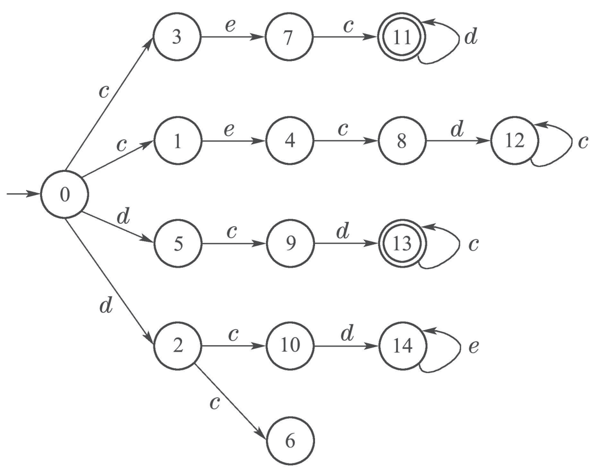


图 5 自动机 $G_{\rm D}$

Fig. 5 Automaton $G_{\rm D}$

为了获得 $G_{\rm D}$ 的状态估计, 规定当 $G_{\rm D}$ 处于状态 $x_i$ 时, 对应的库所 $p_i$ 有一个令牌, 否则, $p_i$ 没有令牌, 即每个库所只有一个令牌或没有令牌. 因此, 规定 $\mathcal{N}_{\rm D}$ 为一个二元Petri网.

**定理 2** 给定一个离散事件系统 $G$, 一个模式故障集 $K$ 及其模式故障类型, 记 $L(G)=L$,

$$G_{\rm D}=(X_{\rm D},\Sigma_{\rm o},\delta_{\rm D},x_{0,{\rm D}},X_{m,{\rm D}}),$$
$$\mathcal{N}_{\rm D}=(P_{\rm D}\cup\{N,F\},T_{\rm D}\cup\{t_{\rm f}\},{\rm Pre}_{\rm D},{\rm Post}_{\rm D},$$
$$M_{0,{\rm D}},\Sigma_{\rm o},l_{\rm D},In_{\rm D}),$$

若 $L$ 关于 $K$ 是S型(或T型)模式故障可诊断的, 则对于任意的 $u\in\mathcal{P}(L)$, ${\rm diag}\{u\}=F$ 当且仅当 $M_{\rm u}(F)=1$.

**证** 由定理1的证明可得

$${\rm diag}(u)=F\Leftrightarrow\forall x'_0\in x_{0,{\rm D}},\delta_{\rm D}(x'_0,u)\subseteq X_{m,{\rm D}}.$$

而

$$\begin{aligned}&\forall x'_0\in x_{0,{\rm D}},\delta_{\rm D}(x'_0,u)\subseteq X_{m,{\rm D}}\Leftrightarrow\\&[\forall p_i\in P_{\rm D},M_{\rm u}(p_i)=1\Rightarrow{\rm In}_{\rm D}(p_i,t_{\rm f})=0]\Leftrightarrow\\&[\forall p_i\in P_{\rm D},{\rm In}_{\rm D}(p_i,t_{\rm f})=1\Rightarrow M_{\rm u}(p_i)=0]\Leftrightarrow\\&M_{\rm u}(F)=1.\end{aligned}$$

综上, ${\rm diag}\{u\}=F\Leftrightarrow M_{\rm u}(F)=1$. 证毕.

根据定理2, 用Petri网诊断器对系统进行在线诊断的过程中, 当库所 $F$ 中有一个令牌时, 可以判定系统出现了故障.

**算法 2** 基于Petri网诊断器 $\mathcal{N}_{\rm D}$ 的模式故障在线诊断算法.

输入:

$$\mathcal{N}_{\rm D}=(P_{\rm D}\cup\{N,F\},T_{\rm D}\cup\{t_{\rm f}\},{\rm Pre}_{\rm D},{\rm Post}_{\rm D},$$
$$M_{0,{\rm D}},\Sigma_{\rm o},l_{\rm D},{\rm In}_{\rm D}).$$

输出: $M_{\rm u}(F)$.

**步骤 1** 初始化系统, 令 $u=\omega=\sigma=\sigma'=\varepsilon$,

$$P_{\rm In}=\{p_i\in P_{\rm D}:{\rm In}_{\rm D}(p_i,t_{\rm f})=1\}.$$

**步骤 2** 记录系统事件 $\sigma$, 当 $\sigma\neq\sigma'$, 跳转到步骤3.

**步骤 3** 令 $u=\omega\sigma$, 对于所有 $t_i\in T_{\rm D}$, 若

$$[\sigma'\in l_{\rm D}(t_i)]\wedge$$
$$[\forall p_i\in I(t_i):M_\omega(p_i)\geqslant{\rm Pre}_{\rm D}(p_i,t_i)],$$

则 $t_i$ 发生.

**步骤 4** 对于所有 $\forall p_i\in I(t_i)\cup O(t_i)$, 进行计算 $M_{\rm u}(p_i)$.

**步骤 5** 若所有 $p_i\in P_{\rm In}$ 都有 $M_{\rm u}(p_i)=0$, 则有 $M_{\rm u}(F)=1$, 否则 $M_{\rm u}(F)=0$.

**步骤 6** 令 $\sigma'=\sigma,\ \omega=\omega\sigma$.

**步骤 7** 若 $M_{\rm u}(F)=1$ 则算法结束, 否则跳转到步骤2.

复杂性分析: 给定一个离散事件系统 $G$, 一个模式故障集 $K=\{k_1,k_2,\cdots,k_r\}$, 令 $|X|=n$, $|\Sigma|=m$, $\|k_i\|=l_i, 1\leqslant i\leqslant r$, $\lambda=\sum\limits_{i=1}^{r}l_i$, 根据定义3, 可得的状态数在最坏的情况下为

$$|X'|=n\sum_{i=1}^{r}(l_i+1)=n(\lambda+r),$$

转移数在最坏的情况下为

$$nm\sum_{i=1}^{r}(l_i+1)=nm(\lambda+r).$$

$G_{\mathrm{D}}$的状态数和转移数与$G'$相同. Petri网诊断器$\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$由$G_{\mathrm{D}}$转换得到的Petri网构造而成, 在最坏的情况下, $\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$的库所数与抑制弧数相同, 为

$$|P_{\mathrm{D}}| = |X'| + 2 = n(\lambda + r) + 2,$$

变迁数为

$$|T_{\mathrm{D}}| = nm(\lambda + r) + n(\lambda + r) + 1 = n(m+1)(\lambda + r) + 1,$$

有向弧数为$n(2m+1)(\lambda + r) + 2$.

因此, 算法1步骤1的复杂性(即构造$G_{\mathrm{D}}$的复杂性)为$\mathrm{O}(\lambda nm)$; 步骤2的复杂性(即将$G_{\mathrm{D}}$转换为Petri网的复杂性)与构造的复杂性相同; 步骤3的复杂性(即构造诊断器$\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$的复杂性)为$\mathrm{O}(\lambda nm)$. 综上可得, 算法1的复杂性为$\mathrm{O}(\lambda nm)$, 它与系统的状态数和事件数为线性关系.

**例 2** 考虑图1的离散事件系统$G$, 根据算法1构造Petri网诊断器$\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$如图6所示.

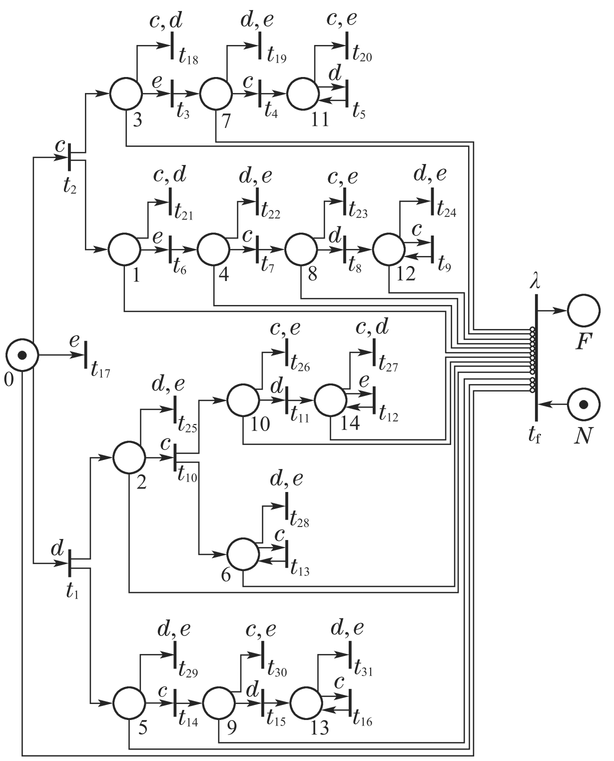


图 6 Petri网诊断器$\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$

Fig. 6 Petri net diagnosers $\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$

假设系统运行路径$u = cecd^*$, 记录每一次观察到的事件$\sigma$, 根据算法2对系统进行在线诊断, 结果如表1所示. 由表1可知, 诊断器在系统初始化时运行, 此时观察到的事件为空, 输出结果为$M_{\mathrm{u}}(F) = 0$表明系统在正常的情况下初始化. 当观察到事件$c$发生后, 变迁$t_2$发生, 输出结果$M_{\mathrm{u}}(F) = 0$, 系统仍未发生故障. 以此类推, 当观察到事件$d$第2次发生后(即表中的序号6), 输出为$M_{\mathrm{u}}(F) = 1$, 此时可以确定系统发生了故障, 诊断结束, 诊断结果与例1 相同.

表 1 诊断结果

Table 1 Diagnostic result

| 序号 | 事件$\sigma$ | 变迁发生序列 | $M_{\mathrm{u}}(F)$ | 发生故障 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | $\varepsilon$ | $\varepsilon$ | 0 | 否 |
| 2 | $c$ | $t_2$ | 0 | 否 |
| 3 | $e$ | $t_3t_6$ | 0 | 否 |
| 4 | $c$ | $t_4t_7$ | 0 | 否 |
| 5 | $d$ | $t_5t_8$ | 0 | 否 |
| 6 | $d$ | $t_5t_{24}$ | 1 | 是 |

## 5 总结

本文研究了离散事件系统的模式故障在线诊断问题, 提出自动机$G_{\mathrm{D}}$可用于S型模式故障和T型模式故障在线诊断. 根据$G_{\mathrm{D}}$提出Petri网诊断器$\mathcal{N}_{\mathrm{D}}$的构造算法及在线诊断算法. 本文提出的Petri网诊断器具有多项式的空间复杂性, 在在线诊断的过程中根据库所的令牌数便可判断系统是否发生了故障, 具有所需储存空间小、效率高等优点.

## 参考文献:

[1] SAMPATH M, SENGUPTA R, LAFORTUNE S, et al. Diagnosability of discrete-event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, 40(9): 1555 – 1575.

[2] QIU W, KUMAR R. Decentralized failure diagnosis of discrete event systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part A: Systems and Humans*, 2006, 36(2): 384 – 395.

[3] WHITE A, KARIMODDINI A, SU R. Fault diagnosis of discrete event systems under unknown initial conditions. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(12): 5246 – 5252.

[4] YIN X, CHEN J, LI Z, et al. Robust fault diagnosis of stochastic discrete event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, 64(10): 4237 – 4244.

[5] DENG W, QIU D. State-based decentralized diagnosis of bi-fuzzy discrete event systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2017, 25(4): 854 – 867.

[6] LIU F, YANG P. Safe diagnosis of stochastic discrete event systems by constructing safe verifier. *Chinese Intelligent Automation Conference*. Singapore: Springer, 2017: 523 – 529.

[7] LIU Fuchun, ZHANG Xu, ZHAO Rui. Current-state opacity of incomplete discrete-event systems. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(7): 1067 – 1071.
(刘富春, 张旭, 赵锐. 不完备离散事件系统的当前状态不透明性. 控制理论与应用, 2019, 36(7): 1167 – 1171.)

[8] GENC S, LAFORTUNE S. Diagnosis of patterns in partially-observed discrete-event systems. *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control*. San Diego, USA: IEEE, 2006: 422 – 427.

[9] JÉRON T, MARCHAND H, PINCHINAT S, et al. Supervision patterns in discrete event systems diagnosis. *2006 8th International Workshop on Discrete Event Systems*. Ann Arbor, USA: IEEE, 2006: 262 – 268.

[10] LIU Fuchun, TANG Shunqiao, ZHAO Rui, et al. Safe pattern-based diagnosability of discrete-event systems. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(1): 162 – 168.

(刘富春, 唐顺桥, 赵锐, 等. 离散事件系统基于模式的安全故障诊断. 控制理论与应用, 2020, 37(1): 162 – 168.)

[11] LIU Fuchun, YAN Fei, ZHAO Rui, et al. Verifier-based pattern diagnosis of fuzzy discrete-event system. *Control and Decision*, 2019. https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1252.
(刘富春, 严飞, 赵锐, 等. 模糊离散事件系统基于验证器的模式故障诊断. 控制与决策, 2019. https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1252.)

[12] CHEN J, KUMAR R. Online failure diagnosis of stochastic discrete event systems. *2013 IEEE Conference on Computer Aided Control System Design*. Hyderabad, Idia: IEEE, 2013: 194 – 199.

[13] CABRAL F G, MOREIRA M V, DIENE O, et al. A Petri net diagnoser for discrete event systems modeled by finite state automata. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(1): 59 – 71.

[14] LIN F, WANG L Y, CHEN W, et al. $N$-diagnosability for active online diagnosis in discrete event systems. *Automatica*, 2017, 83: 220 – 225.

[15] BASILE F, CHIACCHIO P, DE TOMMASI G. An efficient approach for online diagnosis of discrete event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(4): 748 – 759.

[16] CABASINO M P, GIUA A, SEATZU C. Fault detection for discrete event systems using Petri nets with unobservable transitions. *Automatica*, 2010, 46(9): 1531 – 1539.

[17] LIU J, ZHOU Z, WANG Z. Online fault diagnosis in discrete event systems with partially observed Petri nets. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2018, 16(1): 217 – 224.

[18] GOUGAM HE, SUBIAS A, PENCOLÉ Y. Supervision patterns: Formal diagnosability checking by Petri net unfolding. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, 46(22): 73 – 78.

[19] DIMITRI L. Faulty patterns diagnosis for $k$-bounded non-Markovian timed stochastic Petri nets. *IFAC–PapersOnLine*, 2018, 51(11): 235 – 240.

[20] PENCOLÉ Y, SUBIAS A. Timed pattern diagnosis in timed workflows: A model checking approach. *IFAC–PapersOnLine*, 2018, 51(7): 94 – 99.

## 作者简介:

**阙蔡雄** 硕士研究生, 目前研究方向为离散事件系统控制理论、计算机控制, E-mail: quecx@qq.com;

**刘富春** 教授, 博士生导师, 目前研究方向为离散事件系统控制理论、计算机控制, E-mail: fliu2011@163.com;

**赵 锐** 讲师, 博士, 目前研究方向为离散事件系统控制理论、计算机控制, E-mail:zhaorui118204@163.com;

**邓秀勤** 教授, 目前研究方向为智能计算、机器学习, E-mail: dxq706@gdut.edu.cn;

**崔洪刚** 讲师, 博士, 目前研究方向为大数据与智能计算, E-mail: cuihg@163.com.