第 37 卷第 8 期
2020 年 8 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 37 No. 8
Aug. 2020

分布式模糊离散事件系统的故障预测

谢仁可[1], 刘富春[1†], 赵　锐[1], 崔洪刚[1,2]

(1. 广东工业大学 计算机学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省东源县科技创新中心, 广东 河源 517500)

摘要: 本文研究分布式模糊离散事件系统的故障预测问题. 先根据系统的模糊特性, 提出一种分布式模糊离散事件系统的协同可预测性的形式化方法, 使分布式模糊离散事件系统的协同可预测度不小于各分站点的局部可预测度. 通过构造协同预测验证器, 提出一种基于协同预测验证器的协同预测算法, 并得到一个关于分布式模糊离散事件系统协同可预测性的充分必要条件.

关键词: 离散事件系统; 故障预测; 协同可预测性; 模糊系统; 分布式系统

引用格式: 谢仁可, 刘富春, 赵锐, 等. 分布式模糊离散事件系统的故障预测. 控制理论与应用, 2020, 37(8): 1808 – 1814

DOI: 10.7641/CTA.2020.90657

Fault prognosis of decentralized fuzzy discrete-event systems

XIE Ren-ke[1], LIU Fu-chun[1†], ZHAO Rui[1], CUI Hong-gang[1,2]

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

Abstract: This paper studies the problem of fault prognosis of decentralized fuzzy discrete event systems (DESs). Firstly, a formal method of copredictability for decentralized fuzzy DESs is proposed according to the characteristics of systems, which may make the degree of copredictability for decentralized fuzzy DESs no less than that of the local predictability of each site. Then, an algorithm is presented by constructing a coprediction verifier, which achieves a necessary and sufficient condition related to the copredictability for decentralized fuzzy DESs.

Key words: discrete event system; fault prognosis; copredictability; fuzzy system; decentralized system

Citation: XIE Renke, LIU Fuchun, ZHAO Rui, et al. Fault prognosis of decentralized fuzzy discrete-event systems. *Control Theory & Applications*, 2020, 2020, 37(8): 1808 – 1814

1　引言

故障诊断是离散事件系统研究中备受关注的研究课题之一. 早在1995年, Sampath等人提出的基于事件的故障诊断方法将系统的可诊断性定义为系统能够在有限时延内对所发生的故障事件进行诊断[1]. Yoo和Lafortune等人提出了一种多项式复杂度的验证器算法, 能够更快捷的判断离散事件系统的可诊断性[2]. 在文献[3–5]中还有更多基于离散事件系统的故障诊断研究. 上述故障诊断方法都是针对经典系统. 事实上, 针对模糊离散事件系统的故障诊断也有不少相关研究. 文献[6]在模糊离散事件系统的基础上, 提出了一种模糊故障诊断的算法, 文献[7]又给出了模糊离散事件系统故障诊断的一种基于验证器的故障诊断算法.

值得指出的是, 故障诊断虽然可以在系统发生故障之后将其诊断出来, 然而某些重大故障的发生往往会造成不可挽回的损失. 因此, 关于故障预测的研究近年来越来越引起国内外学者关注. Cao首次提出离散事件系统的可预测性[8], 此后, Genc和Lafortune较为系统地给出了可预测性定义及其诊断器和验证器算法[9]. 文献[10]又将离散事件系统的故障预测推广至分布式框架. 最近, Benmessahel等人将模糊离散事件系统的故障诊断推广到了故障预测[11]. 作者在文献[12–13]中也对分布式离散事件系统的可预测性进行了研究.

本文将文献[11–13]中的故障预测方法推广到分布式模糊离散事件系统模型上, 研究多个站点监测下的系统的λ–协同可预测性. 先提出一种分布式模糊离

收稿日期: 2019–08–08; 录用日期: 2020–04–30.

†通信作者. E-mail: fliu2011@163.com; Tel.: +86 13660704883.

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)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61673122), the Natural Science Foundation of Guangdong Province (2019A1515010548) and the Major Awards Incubation Project of School of Computers of GDUT (2016PY01).

散事件系统的λ–协同可预测性的形式化方法, 使分布式模糊系统的协同可预测度不小于各分站点的局部可预测度. 然后通过构造协同预测验证器, 提出一种基于协同预测验证器的协同预测算法, 并得到一个关于分布式模糊离散事件系统λ–协同可预测性的充分必要条件.

2 分布式模糊离散事件系统的协同可预测性

分布式模糊离散事件系统可表示为模糊自动机模型[6]

$$\tilde{G} = (\tilde{Q}, \tilde{\Sigma}, \tilde{\delta}, \tilde{q}_0), \tag{1}$$

其中: $\tilde{Q}$为有限模糊状态集, $\tilde{\Sigma}$为有限模糊事件集, $\tilde{q}_0$为初始状态, $\tilde{\delta}$: $\tilde{Q}\times\tilde{\Sigma}\to\tilde{Q}$为转移函数. 在分布式模糊自动机$\tilde{G}$中, 事件对于可观性和故障性都具有一定的隶属度, 称之为可观度和故障度, 同一事件在不同站点的观测下可能具有不同的可观度. 对于站点i, 定义可观事件集为$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},i}$: $\tilde{\Sigma}\to[0,1]$, 定义不可观事件集为$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{uo},i}:\tilde{\Sigma}\to[0,1]$, 其中: $\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},i}(\tilde{\sigma})$表示事件$\tilde{\sigma}$的可观度, $\tilde{\Sigma}_{\mathrm{uo},i}(\tilde{\sigma})$则表示事件$\tilde{\sigma}$的不可观度, 它们满足$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},i}(\tilde{\sigma})+\tilde{\Sigma}_{\mathrm{uo},i}(\tilde{\sigma})=1$. 故障事件集$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}:\tilde{\Sigma}\to[0,1]$, 其中$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})$表示事件$\tilde{\sigma}$的故障度. 事件串$\tilde{s}$的故障度定义为$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{s})=\max\{\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})\colon\tilde{\sigma}\in\tilde{s}\}$. 串$\tilde{s}$对于第$i$个站点的可观度定义为$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},i}(\tilde{s})=\min\{\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},i}(\tilde{\sigma})\colon\tilde{\sigma}\in\tilde{s}\}$. 故障事件集定义为$\tilde{E}_{\mathrm{f}}=\{\tilde{\sigma}\in\tilde{\Sigma}\colon\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})>0\}$. 由$\tilde{G}$生成语言

$$L(\tilde{G})=\{\tilde{s}\in\tilde{\Sigma}^*:(\exists\tilde{q}\in\tilde{Q})\tilde{\delta}(\tilde{q},\tilde{s})!\},$$

这里$\tilde{\delta}(\tilde{q},\tilde{s})!$表示状态$\tilde{q}$经过串$\tilde{s}$有定义. 以故障度大于或等于$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})$的事件结尾的串的集合为

$$\tilde{\Psi}_{\tilde{\sigma}}=\{\tilde{s}\tilde{e}\in L(\tilde{G}):\tilde{e}\in\tilde{E}_{\mathrm{f}},\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{e})\geqslant\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})\}.$$

串$\tilde{s}$的所有前缀事件串的集合, 也称串$\tilde{s}$的前缀闭包

$$\mathrm{Pref}(\tilde{s})=\{\tilde{t}\in\tilde{\Sigma}^*:(\exists\tilde{a}\in\tilde{\Sigma}^*)(\tilde{t}\tilde{a}=\tilde{s})\}.$$

在定义分站点的投影函数之前, 为了防止串中所有的事件都被投影掉, 本文定义分站点的最大可观度事件集为[6]

$$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{mo},i}=\{\tilde{\sigma}\in\tilde{\Sigma}\colon(\forall\tilde{\sigma}'\in\tilde{\Sigma})\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},i}(\tilde{\sigma})\geqslant\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},i}(\tilde{\sigma}')\}.$$

定义 1 第i个分站点对于事件$\tilde{\sigma}$的投影函数[12]为$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}:\tilde{\Sigma}^*\to\tilde{\Sigma}^*$:

$$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{\alpha})=\begin{cases}\tilde{\alpha}, & \tilde{\alpha}\in\tilde{\Sigma}_{\mathrm{mo},i}\ \text{或}\ \tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},i}(\tilde{\alpha})>\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},i}(\tilde{\sigma}),\\ \varepsilon, & \text{其他情形}.\end{cases} \tag{2}$$

将其推广到事件串有$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{s}\tilde{\alpha})=\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{s})\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{\alpha})$.

给定一个事件串$\tilde{t}$, 其逆投影为$\tilde{P}^{-1}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{t})=\{\tilde{s}\in L(\tilde{G})(\exists\tilde{q}\in\tilde{Q})\tilde{\delta}(\tilde{q}_0,\tilde{s})=\tilde{q}\wedge\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{s})=\tilde{t}\}$.

定义 2 令L为分布式模糊离散事件系统$\tilde{G}$的生成语言, 对于故障事件集$\tilde{E}_{\mathrm{f}}=\{\tilde{\sigma}\}$, 设有$m$个地方站点投影$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}:\tilde{\Sigma}^*\to\tilde{\Sigma}^*, i\in I=\{1,2,\cdots,m\}$, 则

1) $\tilde{G}$具有1–协同可预测性, 当且仅当

$$\begin{cases}(\exists n_0\in\mathbb{N})(\forall n>n_0)(\forall\tilde{s}\in\tilde{\Psi}_{\tilde{\sigma}})\times\\(\exists\tilde{t}\in\mathrm{pref}(\tilde{s}))(\exists i\in I),\\(\forall\tilde{u}\in\tilde{P}^{-1}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{t})))(\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u})<\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma}))\times\\(\forall\tilde{v}\in\dfrac{L}{\tilde{u}})(\|\tilde{v}\|=n)\Rightarrow\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}\tilde{v})\geqslant\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma}).\end{cases} \tag{3}$$

2) $\tilde{G}$具有λ–协同可预测性($\lambda\in[0,1]$), 当且仅当

$$\begin{cases}(\exists n_0\in\mathbb{N})(\forall n>n_0)(D_1\wedge D_2):\\D_1:(\exists\tilde{s}\in\tilde{\Psi}_{\tilde{\sigma}})(\exists\tilde{t}\in\mathrm{pref}(\tilde{s}))(\exists i\in I)\times\\(\exists\tilde{u}\in\tilde{P}^{-1}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{t})))(\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u})<\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma}))\times\\(\exists\tilde{v}\in\dfrac{L}{\tilde{u}})(\|\tilde{v}\|=n)\Rightarrow\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}\tilde{v})=\lambda\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma}),\\D_2:(\forall\tilde{s}\in\tilde{\Psi}_{\tilde{\sigma}})(\exists\tilde{t}\in\mathrm{pref}(\tilde{s}))(\exists i\in I)\times\\(\forall\tilde{u}\in\tilde{P}^{-1}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{t})))(\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u})<\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma}))\times\\(\forall\tilde{v}\in\dfrac{L}{\tilde{u}})(\|\tilde{v}\|=n)\Rightarrow\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}\tilde{v})\geqslant\lambda\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma}).\end{cases} \tag{4}$$

3) $\tilde{G}$具有0–协同可预测性, 当且仅当

$$\begin{cases}(\exists n_0\in\mathbb{N})(\forall n>n_0)(\exists\tilde{s}\in\tilde{\Psi}_{\tilde{\sigma}})\times\\(\exists\tilde{t}\in\mathrm{pref}(\tilde{s}))(\forall i\in I),\\(\exists\tilde{u}\in\tilde{P}^{-1}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{t})))(\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u})<\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma}))\times\\(\exists\tilde{v}\in\dfrac{L}{\tilde{u}})(\|\tilde{v}\|=n)\Rightarrow\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}\tilde{v})=0.\end{cases} \tag{5}$$

此定义中将协同可预测性分为3部分, 其中λ–协同可预测性是指该分布式模糊离散事件系统具有协同可预测性的隶属度为λ. 当$\lambda=0$时, 条件D_1就等价于3)中的定义(表示模糊系统$\tilde{G}$对故障完全不可预测), 当$\lambda=1$时, 条件D_2就等价于1)中的定义(表示模糊系统$\tilde{G}$对故障完全可预测). 在2)的定义中, D_1表示存在一个符合条件的串$\tilde{u}\tilde{v}$的故障度等于$\lambda\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})$, D_2表示其他符合条件的串$\tilde{u}\tilde{v}$的故障度都不小于$\lambda\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})$.

3 协同预测验证器的构建

设分布式模糊离散事件系统$\tilde{G}=(\tilde{Q},\tilde{\Sigma},\tilde{\delta},\tilde{q}_0)$的故障事件集$\tilde{E}_{\mathrm{f}}=\{\tilde{\sigma}\}$, 且有$m$个地方站点投影

$$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}\colon\tilde{\Sigma}^*\to\tilde{\Sigma}^*,\ i\in I=\{1,2,\cdots,m\},$$

本地投影$\tilde{P}_{\tilde{\sigma}}\colon\tilde{\Sigma}^*\to\tilde{\Sigma}^*$, 那么该分布式模糊自动机的协同预测验证器可构建为$\tilde{G}_{\mathrm{V}}=(\tilde{Q}_{\mathrm{V}},\tilde{\Sigma}_{\mathrm{V}},\tilde{\delta}_{\mathrm{V}},\tilde{\tau}_0)$. 其中: 事件集$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{V}}=\tilde{\Sigma}\cup\{\varepsilon\}$; 状态集$\tilde{Q}_{\mathrm{V}}=(\tilde{Q}\times\Delta)^{m+1}$, 标签$\Delta=\{N^\mu,F\}$, 其中$N^\mu$表示同元组的状态$\tilde{q}\in\tilde{Q}$在$\tilde{G}$中为正常状态, 且其故障度为$\mu$, F表示同元组的$\tilde{q}$为故障状态, 且其故障度大于或等于$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})$. 一般地, 设验证器的初始状态为

$$\tilde{\tau}_0=\{\tilde{q}_0,N^0;\tilde{q}_0,N^0;\cdots;\tilde{q}_0,N^0\},$$

验证器中的状态

$$\tilde{\tau}=\{\tilde{q}_1,l_1;\tilde{q}_2,l_2;\cdots;\tilde{q}_{m+1},l_{m+1}\}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}},$$

其中$\{\tilde{q}_1,\cdots,\tilde{q}_{m+1}\}\subset\tilde{Q}$, $\{l_1,\cdots,l_{m+1}\}\subset\Delta$. 下面给出协同预测验证器中正常状态和故障状态的定义.

定义 3 在模糊离散事件系统$\tilde{G}$生成的验证器$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$中, 设状态$\tilde{\tau}=\{\tilde{q}_1,l_1;\cdots;\tilde{q}_{m+1},l_{m+1}\}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}$, 若$l_1,\cdots,l_{m+1}$都不为$F$, 则称$\tilde{\tau}$为正常状态, 记为$\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{N}$; 若$l_1,\cdots,l_{m+1}$中存在一个$F$, 则称$\tilde{\tau}$为故障状态, 记为$\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{F}$.

为了简便起见, 在定义验证器$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$的转移函数$\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}$时, 仅取两个地方站点投影的情况, 即$m=2$, 则当状态$\tilde{\tau}=\{\tilde{q}_1,l_1;\tilde{q}_2,l_2;\tilde{q}_3,l_3\}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}$, 发生事件$\tilde{\alpha}\in\tilde{\Sigma}_{\mathrm{V}}$时, 可分为以下4种情况:

1) 若$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},1}(\tilde{\alpha})>\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},1}(\tilde{\sigma})$, 且$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},2}(\tilde{\alpha})\leqslant\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},2}(\tilde{\sigma})$, 则

$$\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau},\tilde{\alpha})=\begin{cases}(\tilde{\delta}(\tilde{q}_1,\tilde{\alpha}),l_1';\tilde{q}_2,l_2;\tilde{\delta}(\tilde{q}_3,\tilde{\alpha}),l_3'),\\(\tilde{q}_1,l_1;\tilde{\delta}(\tilde{q}_2,\tilde{\alpha}),l_2';\tilde{q}_3,l_3),\\(\tilde{\delta}(\tilde{q}_1,\tilde{\alpha}),l_1';\tilde{\delta}(\tilde{q}_2,\tilde{\alpha}),l_2';\tilde{\delta}(\tilde{q}_3,\tilde{\alpha}),l_3').\end{cases}\tag{6}$$

2) 若$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},1}(\tilde{\alpha})\leqslant\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},1}(\tilde{\sigma})$, 且$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},2}(\tilde{\alpha})>\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},2}(\tilde{\sigma})$, 则

$$\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau},\tilde{\alpha})=\begin{cases}(\tilde{\delta}(\tilde{q}_1,\tilde{\alpha}),l_1';\tilde{q}_2,l_2;\tilde{q}_3,l_3),\\(\tilde{q}_1,l_1;\tilde{\delta}(\tilde{q}_2,\tilde{\alpha}),l_2';\tilde{\delta}(\tilde{q}_3,\tilde{\alpha}),l_3'),\\(\tilde{\delta}(\tilde{q}_1,\tilde{\alpha}),l_1';\tilde{\delta}(\tilde{q}_2,\tilde{\alpha}),l_2';\tilde{\delta}(\tilde{q}_3,\tilde{\alpha}),l_3').\end{cases}\tag{7}$$

3) 若$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},1}(\tilde{\alpha})>\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},1}(\tilde{\sigma})$, 且$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},2}(\tilde{\alpha})>\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},2}(\tilde{\sigma})$, 则

$$\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau},\tilde{\alpha})=(\tilde{\delta}(\tilde{q}_1,\tilde{\alpha}),l_1';\tilde{\delta}(\tilde{q}_2,\tilde{\alpha}),l_2';\tilde{\delta}(\tilde{q}_3,\tilde{\alpha}),l_3').\tag{8}$$

4) 若$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},1}(\tilde{\alpha})\leqslant\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},1}(\tilde{\sigma})$, 且$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},2}(\tilde{\alpha})\leqslant\tilde{\Sigma}_{\mathrm{o},2}(\tilde{\sigma})$, 则

$$\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau},\tilde{\alpha})=\begin{cases}(\tilde{\delta}(\tilde{q}_1,\tilde{\alpha}),l_1';\tilde{q}_2,l_2;\tilde{q}_3,l_3),\\(\tilde{q}_1,l_1;\tilde{\delta}(\tilde{q}_2,\tilde{\alpha}),l_2';\tilde{q}_3,l_3),\\(\tilde{q}_1,l_1;\tilde{q}_2,l_2;\tilde{\delta}(\tilde{q}_3,\tilde{\alpha}),l_3'),\\(\tilde{\delta}(\tilde{q}_1,\tilde{\alpha}),l_1';\tilde{\delta}(\tilde{q}_2,\tilde{\alpha}),l_2';\tilde{\delta}(\tilde{q}_3,\tilde{\alpha}),l_3'),\end{cases}\tag{9}$$

其中对于以上的标签$\{l_i'|i=1,2,3\}$:

a) 当$l_i=N^{\mu}$时, 标签

$$l_i'=\begin{cases}N^{\max\{\mu,\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}(\tilde{\alpha})}\}}, & \tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\alpha})<\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma}),\\F, & \tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\alpha})\geqslant\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma});\end{cases}\tag{10}$$

b) 当$l_i=F$时, 标签$l_i'=F$.

若在第i个地方站点中$\tilde{\delta}(\tilde{q}_i,\tilde{\alpha})$没有定义, 那么验证器的转移函数中, 所有含有此转移的状态都将不会出现. 例如, 若$\tilde{\delta}(\tilde{q}_1,\tilde{\alpha})$无定义, 那么式(6)中将只有$(\tilde{q}_1,l_1;\tilde{\delta}(\tilde{q}_2,\tilde{\alpha}),l_2';\tilde{q}_3,l_3)$这一种转移. 若在$\tilde{\tau}$中所有的$\tilde{\delta}(\tilde{q}_i,\tilde{\alpha})$均无定义, 且$l_3=F$, 则验证器将在此故障状态处进入死锁状态, 因此, 本文将在这样的故障状态后加上单事件ε的自循环.

在构建完协同预测验证器后, 本文提供一个可达操作, 生成系统从某个状态出发的可达部分自动机.

定义 4 在由模糊离散事件系统$\tilde{G}$生成的验证器$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$中, 令$\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}$, 则$\tilde{\tau}$在验证器$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$中的可达部分自动机表示为$\mathrm{Ac}(\tilde{G}_{\mathrm{V}},\tilde{\tau})=(\tilde{Q}_{\mathrm{AC}},\tilde{\Sigma}_{\mathrm{V}},\tilde{\delta}_{\mathrm{AC}},\tilde{\tau})$, 其中:

$$\tilde{Q}_{\mathrm{AC}}=\{\tilde{\tau}'\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}:(\exists\tilde{s}\in\tilde{\Sigma}_{\mathrm{V}}^{*})\tilde{\tau}'\in\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau},\tilde{s})\},$$

$$\tilde{\delta}_{\mathrm{AC}}=\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}|_{\tilde{Q}_{\mathrm{AC}}\times\tilde{\Sigma}_{\mathrm{V}}}.$$

4 协同预测验证器的充分必要条件及协同预测算法

在提出了构建协同预测验证器的方法之后, 本文将给出一些定义, 然后给出该验证器计算分布式模糊系统的协同可预测性的充分必要条件.

定义 5 在由$\tilde{G}$生成的验证器$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$中, 给定一个验证器的状态集合$\{\tilde{\tau}_0,\tilde{\tau}_1,\cdots,\tilde{\tau}_k\}\subset\tilde{Q}_{\mathrm{V}}$, 若

$$\exists\tilde{s}=\{\tilde{\sigma}_0,\tilde{\sigma}_1,\cdots,\tilde{\sigma}_k\}\subset L(\tilde{G}_{\mathrm{V}}),$$

满足

$$\begin{cases}\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau}_0,\tilde{\sigma}_0)=\tilde{\tau}_1,\\\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau}_\xi,\tilde{\sigma}_\xi)=\tilde{\tau}_{\xi+1},\ \xi=1,\cdots,k-1,\\\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau}_k,\tilde{\sigma}_k)=\tilde{\tau}_0,\end{cases}\tag{11}$$

则称状态集合$\{\tilde{\tau}_0,\tilde{\tau}_1,\cdots,\tilde{\tau}_k\}$在$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$中形成了环.

定义 6 在由$\tilde{G}$生成的验证器$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$中, 若给定状态集合$\{\tilde{\tau}_0,\tilde{\tau}_1,\cdots,\tilde{\tau}_k\}\subset\tilde{Q}_{\mathrm{V}}$在验证器$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$中形成了一个环, 令

$$\tilde{\tau}_0=(\tilde{q}_1^0,l_1^0;\cdots;\tilde{q}_i^0,l_i^0;\cdots;\tilde{q}_{m+1}^0,l_{m+1}^0),$$

$i\in\{1,2,\cdots,m\}$, 若$l_{m+1}^0=F$, 且$l_i^0=N^{\mu}$, 则称此环为$i-\mu F$环. 若$l_1^0=\cdots=l_{m+1}^0=F$, 则称此环为F环.

定义 7 在由$\tilde{G}$生成的验证器$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$中, 令状态$\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{N}$, 则临界正常状态$\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{P}$:

$$\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{P}=\{\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{N}:(\exists\tilde{\sigma}\in\tilde{E}_{\mathrm{f}})\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau},\tilde{\sigma})\cap\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{F}\neq\varnothing\}.\tag{12}$$

若$\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{P}$, 且$\mathrm{Ac}(\tilde{G}_{\mathrm{V}},\tilde{\tau})$中存在$F$环, 则称该状态为可达$F$环状态, 记为$\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{P-F}$.

定义 8 令验证器状态$\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{P-F}$, 对于故障事件集$\tilde{E}_{\mathrm{f}}=\{\tilde{\sigma}\}$, 给定地方站点$i\in I$, 设$\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau}_0,\tilde{\omega})=\tilde{\tau}$, 从初始状态可到达的状态中, 其事件串与到达$\tilde{\tau}$的事件串投影相同的状态集合为

$$\tilde{Q}_i'(\tilde{\tau})=\{\tilde{\tau}':(\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau}_0,\tilde{\omega}')=\tilde{\tau}')\wedge(\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{\omega})=\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{\omega}'))\}.\tag{13}$$

引理 1 给定模糊自动机$\tilde{G}$与其验证器$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$, 其中$\tilde{E}_{\mathrm{f}}=\{\tilde{\sigma}\}$, 对于地方站点投影$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}:\tilde{\Sigma}^*\to\tilde{\Sigma}^*$, 给

定一个站点$i\in\{1,2,\cdots,m\}$, 给定状态$\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{P-F}$, 则 $\bigcup\limits_{\tilde{\tau}'\in\tilde{Q}_i'(\tilde{\tau})}\mathrm{Ac}(\tilde{G}_V,\tilde{\tau}')$ 中的最小$i-\mu F$环满足H,

$$\begin{aligned}H:\ &(\exists n_0\in\mathbb{N})(\forall n>n_0)(\exists\tilde{s}\in\tilde{\Psi}_{\tilde{\sigma}})(\exists\tilde{t}\in\mathrm{pref}(\tilde{s})),\\&(\forall\tilde{u}\in\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}^{-1}(\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{t})))(\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u})<\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma}))\\&(\forall\tilde{v}\in\frac{L}{\tilde{u}})(\|\tilde{v}\|=n)\Rightarrow\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}\tilde{v})\geqslant\mu.\end{aligned}\tag{14}$$

证　(充分性)在由$\tilde{G}$生成的验证器$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$中, 设状态$\tilde{\tau}'\in\tilde{G}_{\mathrm{V}}$, 取$\mathrm{Ac}(\tilde{G}_{\mathrm{V}},\tilde{\tau}')$ 中最小$i-\mu F$环中的状态$\tilde{\tau}_{\mathrm{F}}$. 设$\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau}',\tilde{\omega})=\tilde{\tau}_{\mathrm{F}}$, 则在$\tilde{G}$中一定存在事件串$\tilde{\omega}_i$和$\tilde{\omega}_{m+1}$, 满足$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{\omega}_i)=\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{\omega}_{m+1})=\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{\omega})$, 且$\tilde{\sigma}\in\tilde{\omega}_{m+1}$, $\tilde{\sigma}\notin\tilde{\omega}_i$. 令$\tilde{\omega}_{m+1}=\tilde{\eta}_1\tilde{\sigma}\tilde{\eta}_2$, 其中$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\eta}_1)<\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})$. 令$\tilde{s}=\tilde{\eta}_1\tilde{\sigma}$, 那么$\tilde{t}\in\mathrm{pref}(\tilde{s})$ 且$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{t})<\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})$, 同时有$\tilde{t}\in\mathrm{pref}(\tilde{\omega}_{m+1})$. 又因为$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{\omega}_i)=\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{\omega}_{m+1})$, 故串$\tilde{\omega}_i$的前缀中必定存在与串$\tilde{t}$投影相同的串, 即

$$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\mathrm{pref}(\tilde{\omega}_i))=\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{t}).$$

令$\tilde{u}=\mathrm{pref}(\tilde{\omega}_i)$, 取$n_0=\|\tilde{\eta}_1\|-\|\tilde{t}\|$, 则$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}\tilde{v})=\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\omega}_i)=\mu$, 由于$\tilde{\tau}_{\mathrm{F}}$为$\mathrm{Ac}(\tilde{G}_{\mathrm{V}},\tilde{\tau}')$中最小$i-\mu F$环中的状态, 故有$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}\tilde{v})\geqslant\mu$.

(必要性)给定事件串$\tilde{s}=\tilde{s}_0\tilde{\sigma}$, 且$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{s}_0)<\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})$. 令$\tilde{t}=\tilde{s}_0$, 则与串$\tilde{t}$投影相同的串$\tilde{u}$的集合为$\tilde{u}(X)$, 则有$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{s})=\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{s}_0)=\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}(\tilde{u}(X))$. 设在原自动机$\tilde{G}$中有转移

$$\tilde{\delta}(\tilde{q}_0,\tilde{s}_0)=\tilde{q}_0',\ \tilde{\delta}(\tilde{q}_0,\tilde{s})=\tilde{q}_{\mathrm{F}},$$
$$\tilde{\delta}(\tilde{q}_{\tilde{u}(X)},\tilde{u}(X))=\tilde{q}_{\tilde{u}(X)}',$$

则在验证器$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$中必定存在状态

$$\tilde{\tau}=(\tilde{q}_0',N^{\mu_{\mathrm{s}}};\tilde{q}_0',N^{\mu_{\mathrm{s}}}),\ \tilde{\tau}_{\mathrm{F}}=(\tilde{q}_{\mathrm{F}},F;\tilde{q}_{\mathrm{F}},F),$$
$$\tilde{\tau}_{\tilde{u}(X)}=(\tilde{q}_{\tilde{u}(X)},N^{\mu_{\mathrm{X}}};\tilde{q}_{\mathrm{F}},F),$$

其中: $\mu_{\mathrm{s}}=\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{s}_0)$, $\mu_X=\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}(X))$. 可见$\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathbf{V}}^{N}$时,

$$\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau},\tilde{\sigma})=\tilde{\tau}_{\mathrm{F}}.$$

由定义 8 可知, $\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{P-F}$, $\tilde{\tau}_{\tilde{u}(X)}\in\tilde{Q}_i'(\tilde{\tau})$. 则$\mathrm{Ac}(\tilde{G}_{\mathrm{V}},\tilde{\tau}_{\tilde{u}(X)})$是指状态$\tilde{\tau}_{\tilde{u}(X)}$经过串$\tilde{u}(X)$的后续串$\tilde{v}_{\mathrm{X}}\in\dfrac{L}{\tilde{u}(X)}$之后到达的部分, 可分为两种情况:

1) $\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau}_{\tilde{u}(X)},\tilde{v}_{\mathrm{X}})$无定义, 即发生了死锁, 由于

$$\tilde{\tau}_{\tilde{u}(X)}=(\tilde{q}_{\tilde{u}(X)},N^{\mu_{\mathrm{X}}};\tilde{q}_{\mathrm{F}},F),$$

则添加的单事件ε的自循环即为$i-\mu_{\mathrm{X}}F$环.

2) $\tilde{\delta}_{\mathrm{V}}(\tilde{\tau}_{\tilde{u}(X)},\tilde{v}_{\mathrm{X}})$有定义, 由$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$为有限状态自动机, 则当$\|\tilde{v}\|$足够大时, 其后续一定会在验证器中形成一个环. 设环中的状态

$$\tilde{\tau}_{\tilde{u}(X)\tilde{v}_{\mathrm{X}}}=(\tilde{q}_{\tilde{u}(X)\tilde{v}_{\mathrm{X}}},N^{\mu_{\mathrm{X}}'};\tilde{q}_{\mathrm{F}},F),$$

其中$\mu_{\mathrm{X}}'=\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}(X)\tilde{v}_{\mathrm{X}})$, 这时此环为$i-\mu_{\mathrm{X}}'F$环.

综合以上两种情况, $\mathrm{Ac}(\tilde{G}_{\mathrm{V}},\tilde{\tau}_{\tilde{u}(X)})$中的最小$i-\mu F$环中,

$$\mu=\min\{\mu_{\mathrm{X}},\mu_{\mathrm{X}}'\}=\min\{\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}(X)),\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}(X)\tilde{v}_{\mathrm{X}})\},$$

故$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}\tilde{v})\geqslant\mu$.　　证毕.

定理 1　给定模糊自动机$\tilde{G}=(\tilde{Q},\tilde{\Sigma},\tilde{\delta},\tilde{q}_0)$, 其故障事件集为$\tilde{E}_{\mathrm{f}}=\{\tilde{\sigma}\}$, 各个地方站点投影$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}:\tilde{\Sigma}^*\to\tilde{\Sigma}^*$, $i\in I$. $\tilde{G}_{\mathrm{V}}=(\tilde{Q}_{\mathrm{V}},\tilde{\Sigma}_{\mathrm{V}},\tilde{\delta}_V,\tilde{\tau}_0)$为$\tilde{G}$生成的协同预测验证器, 那么$\tilde{G}$对于故障事件集$\tilde{E}_{\mathrm{f}}$, 地方站点投影$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}$具有$\lambda$–协同可预测性, 当且仅当

$$\min\{\max\{\mu:i\in I\}:\forall\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{P-F}\}=\lambda\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma}),\tag{15}$$

其中$\mu=\{\bigcup\limits_{\tilde{\tau}'\in\tilde{Q}_i'(\tilde{\tau})}\mathrm{Ac}(\tilde{G}_{\mathrm{V}},\tilde{\tau}')$中最小的$i-\mu F$环$\}$.

证　(充分性)由定义2中的式(4)可知, 由系统$\tilde{G}$具有λ–协同可预测性可以得到条件D_1和D_2. 在条件D_2下, 给定串$\tilde{s}\in\tilde{\Psi}_{\tilde{\sigma}}$和站点$i$, 可以知道$\tilde{\tau}'$的可达部分最小的$i-\mu F$环中$\mu=\lambda\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})$. 因为只需要存在一个地方站点投影中的最小$i-\mu F$环满足$\mu=\lambda\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})$, 所以, μ对站点i取最大值. 由于验证器和原自动机都为有限状态自动机, 故$\tilde{s}\in\tilde{\Psi}_{\tilde{\sigma}}$中的每个串都将在验证器中可到达$F$环. 在这里, 要使对于所有的串$s$都满足条件, 只需要取其中的最小值即可.

(必要性)由引理1可知, $\tilde{\tau}'$的可达部分自动机中最小的$i-\mu F$环满足条件H. 对于地方站点投影$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}$, 当$\mu$取其中的最大值时, 就一定存在一个地方站点投影使得条件H成立. 对于以故障事件结尾的事件串的集合$\tilde{s}\in\tilde{\Psi}_{\tilde{\sigma}}$, 当$\mu$取其中的最小值时, 那么所有的串$\tilde{s}$都满足条件$H$, 即可得条件$D_2$. 在引理1的必要性证明中, 已经证得$\mathrm{Ac}(\tilde{G}_{\mathrm{V}},\tilde{\tau}_{\tilde{u}(X)})$中的最小$i-\mu F$环中

$$\mu=\min\{\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}(X)),\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}(X)\tilde{v}_{\mathrm{X}})\}.$$

当$\mu=\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}(X)\tilde{v}_{\mathrm{X}})$, 即$\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{u}\tilde{v})=\mu=\lambda\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma})$, 可得条件$D_1$. 由条件$D_1$和$D_2$可知$\tilde{G}$对于故障事件集$\tilde{E}_{\mathrm{f}}$, 地方站点$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}$具有$\lambda$–协同可预测性.　　证毕.

定理 2　$\tilde{G}$对于故障事件集$\tilde{E}_{\mathrm{f}}$, 地方站点投影$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}$具有0–协同可预测性(表示模糊系统$\tilde{G}$对故障完全不可预测), 当且仅当

$$\exists\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{P-F},\ \forall i\in I=\{1,2,\cdots,m\}\Rightarrow\mu=0,\tag{16}$$

其中$\mu=\{\bigcup\limits_{\tilde{\tau}'\in\tilde{Q}_i'(\tilde{\tau})}\mathrm{Ac}(\tilde{G}_{\mathrm{V}},\tilde{\tau}')$中最小的$i-\mu F$环$\}$.

证　由定理1得(即定理1中取$\lambda=0$的情形).

定理 3　$\tilde{G}$对于故障事件集$\tilde{E}_{\mathrm{f}}$, 地方站点投影$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}$具有1–协同可预测性(表示模糊系统$\tilde{G}$对故障完全可预测), 当且仅当

$$\forall\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\mathrm{V}}^{P-F},\ \exists i\in I\Rightarrow\mu=\tilde{\Sigma}_{\mathrm{f}}(\tilde{\sigma}),\tag{17}$$

其中$\mu=\{\bigcup\limits_{\tilde{\tau}'\in\tilde{Q}_i'(\tilde{\tau})}\mathrm{Ac}(\tilde{G}_{\mathrm{V}},\tilde{\tau}')$中最小的$i-\mu F$环$\}$.

证 由定理1得(即定理1中取$\lambda = 1$的情形).

根据定理1, 本文将给出以下算法, 判断模糊离散事件系统$\tilde{G}$对于故障事件集$\tilde{E}_{\rm f}$, 地方站点投影$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}:\tilde{\Sigma}^*\to\tilde{\Sigma}^*$的$\lambda$–协同可预测性:

算法 1 基于验证器的协同预测算法.

输入: $\tilde{G}=(\tilde{Q},\tilde{\Sigma},\tilde{\delta},\tilde{q}_0)$, 故障事件集$\tilde{E}_{\rm f}$, 地方站点投影$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}:\tilde{\Sigma}^*\to\tilde{\Sigma}^*$.

步骤 1 通过$\tilde{G}$构建$\tilde{G}_{\rm V}=(\tilde{Q}_{\rm V},\tilde{\Sigma}_{\rm V},\tilde{\delta}_{\rm V},\tilde{\tau}_0)$;

步骤 2 在验证器$\tilde{G}_{\rm V}$中找出$\tilde{Q}_{\rm V}^P$, 以及对应的可到达F环的状态集$\tilde{Q}_{\rm V}^{P-F}$;

步骤 3 令$\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\rm V}^{P-F}$, 在$\tilde{G}_{\rm V}$中找出每个站点$i$对应的$\tilde{Q}'_i(\tilde{\tau})$;

步骤 4 在${\rm Ac}(\tilde{G}_{\rm V},\tilde{Q}'_i(\tilde{\tau}))$中找出最小$i-\mu F$环;

步骤 5 通过定理1中的式(15)进一步计算出

$$\lambda=\frac{\min\{\max\{\mu:i\in I\}:\forall\tilde{\tau}\in\tilde{Q}_{\rm V}^{P-F}\}}{\tilde{\Sigma}_{\rm f}(\tilde{\sigma})}.$$

输出: $\tilde{G}$对于故障事件集$\tilde{E}_{\rm f}$, 地方站点投影$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}:\tilde{\Sigma}^*\to\tilde{\Sigma}^*$具有$\lambda$–协同可预测性.

给定模糊自动机$\tilde{G}=(\tilde{Q},\tilde{\Sigma},\tilde{\delta},\tilde{q}_0)$, 设状态数$\|\tilde{Q}\|=n_1$, 事件数$\|\tilde{\Sigma}\|=n_2$, 站点数$\|I\|=m$.

定理 4 给定模糊自动机$\tilde{G}=(\tilde{Q},\tilde{\Sigma},\tilde{\delta},\tilde{q}_0)$, 对于故障事件集$\tilde{E}_{\rm f}=\{\tilde{\sigma}\}$, 其协同预测验证器的构建复杂度为$\Theta(n_2m(n_1n_2)^{m+1})$.

证 通过式(10)可知, 标签Δ最多有n_2种, 故验证器中的状态数最多为$(n_1n_2)^{m+1}$个. 由式(6)–(9)可知, 每个状态最多有$n_2(m+2)$个转移, 因此, 构建该协同预测验证器的空间复杂度为$\Theta(n_2m(n_1n_2)^{m+1})$.

证毕.

例 1 设模糊自动机$\tilde{G}=(\tilde{Q},\tilde{\Sigma},\tilde{\delta},\tilde{q}_0)$如图1所示, 其模糊事件集$\tilde{\Sigma}=\{\tilde{a},\tilde{b},\tilde{e},\tilde{g},\tilde{h},\tilde{\sigma}\}$, 各模糊事件的故障度见表1. 故障事件集$\tilde{E}_{\rm f}=\{\tilde{\sigma}\}$. 设此自动机有两个地方站点投影: $\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}:\tilde{\Sigma}^*\to\tilde{\Sigma}^*$, $i\in\{1,2\}$, 各模糊事件的可观度见表1. 下面本文分别运用本文提出的定义法(即定义2)和定理法(即定理1)判断模糊自动机$\tilde{G}$的协同可预测性.

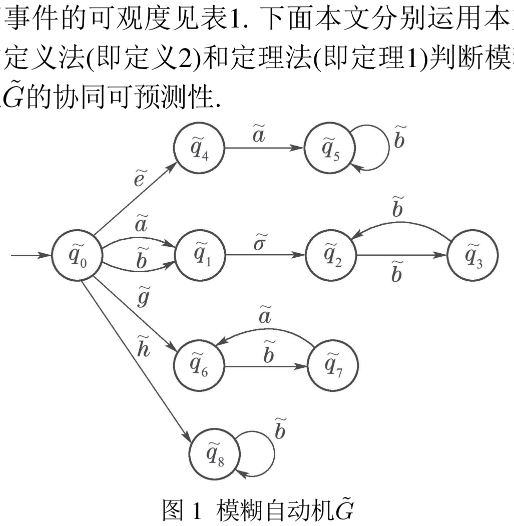

图 1 模糊自动机$\tilde{G}$

Fig. 1 Fuzzy automation $\tilde{G}$

表 1 模糊事件的可观度及故障度

Table 1 Degree of observability and the fault degree of fuzzy events

	$\tilde{a}$	$\tilde{b}$	$\tilde{e}$	$\tilde{g}$	$\tilde{h}$	$\tilde{\sigma}$
$\tilde{\Sigma}_{{\rm o},1}$	1.0	0.8	0.1	0.1	0.3	0.2
$\tilde{\Sigma}_{{\rm o},2}$	1.0	0.8	0.3	0.3	0.1	0.2
$\tilde{\Sigma}_{\rm f}$	0.1	0.2	0.0	0.6	0.4	0.8

定义法: 串$s\in\tilde{\Psi}_{\tilde{\sigma}}=\{\tilde{a}\tilde{\sigma},\tilde{b}\tilde{\sigma}\}$, 当$s=\tilde{a}\tilde{\sigma}$时, 对于站点1, 符合条件的串$\tilde{u}\tilde{v}=\{\tilde{e}\tilde{a}\tilde{b}^*,\tilde{a}\tilde{\sigma}\tilde{b}^*\}$, 在条件$D_2$中, 所有的串$\tilde{u}\tilde{v}$都需要参与预测过程, 则取其中故障度最小的串, 即$\tilde{\Sigma}_{\rm f}(\tilde{u}\tilde{v})=\tilde{\Sigma}_{\rm f}(\tilde{e}\tilde{a}\tilde{b}^*)=0.2$. 对于站点2, 符合条件的串$\tilde{u}\tilde{v}=\{\tilde{a}\tilde{\sigma}\tilde{b}^*\}$, 即$\tilde{\Sigma}_{\rm f}(\tilde{u}\tilde{v})=0.8$. 在条件$D_2$中, 只需存在站点满足条件, 则对站点取最大值, 即

$$\tilde{\Sigma}_{\rm f}(\tilde{u}\tilde{v})=\max\{0.2,0.8\}=0.8;$$

当$s=\tilde{b}\tilde{\sigma}$时, 对于站点1, 串$\tilde{u}\tilde{v}=\{\tilde{g}(\tilde{b}\tilde{a})^*,\tilde{b}\tilde{\sigma}\tilde{b}^*\}$, 取其中故障度最小的串, 可得$\tilde{\Sigma}_{\rm f}(\tilde{u}\tilde{v})=0.6$. 对于站点2, 串$\tilde{u}\tilde{v}=\{\tilde{h}\tilde{b}^*,\tilde{b}\tilde{\sigma}\tilde{b}^*\}$, 即$\tilde{\Sigma}_{\rm f}(\tilde{u}\tilde{v})=0.4$, 对站点取最大值可得$\tilde{\Sigma}_{\rm f}(\tilde{u}\tilde{v})=0.6$. 在条件$D_2$中, 需要所有的串$s\in\tilde{\Psi}_{\tilde{\sigma}}$都参与预测过程, 同样的, 取最小值可得

$$\tilde{\Sigma}_{\rm f}(\tilde{u}\tilde{v})=\min\{0.8,0.6\}=0.6.$$

当$\lambda=0.75$时, $\tilde{\Sigma}_{\rm f}(\tilde{u}\tilde{v})=\lambda\tilde{\Sigma}_{\rm f}(\tilde{\sigma})$, 满足条件$D_1$和$D_2$. 因此$\tilde{G}$对$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}$, $\tilde{E}_{\rm f}$ 具有0.75–协同可预测性.

定理法: 通过第3节中的验证器构建过程, 可以得到由模糊自动机$\tilde{G}$构建的验证器$\tilde{G}_{\rm V}$如图2所示. 由定义7有

$$\begin{aligned}
&\tilde{Q}_{\rm V}^P=\{\tilde{\tau}_1,\tilde{\tau}_2,\tilde{\tau}_3,\tilde{\tau}_4,\tilde{\tau}_5\},\\
&\tilde{Q}_{\rm V}^{P-F}=\{\tilde{\tau}_2,\tilde{\tau}_3\},\\
&\tilde{\tau}_1=\{5N^{0.1},1N^{0.1},1N^{0.1}\},\\
&\tilde{\tau}_2=\{1N^{0.1},1N^{0.1},1N^{0.1}\},\\
&\tilde{\tau}_3=\{1N^{0.2},1N^{0.2},1N^{0.2}\},\\
&\tilde{\tau}_4=\{7N^{0.6},1N^{0.2},1N^{0.2}\},\\
&\tilde{\tau}_5=\{1N^{0.2},8N^{0.4},1N^{0.2}\}.
\end{aligned}$$

由定义8有$\tilde{Q}'_1(\tilde{\tau}_2)=\{\tilde{\tau}_1,\tilde{\tau}_2\}$. 又由定义4可知, 在$\tilde{\tau}_1$的可达部分自动机${\rm Ac}(\tilde{G}_V,\tilde{\tau}_1)$中存在环

$$\{(\tilde{q}_2,F;\tilde{q}_2,F;\tilde{q}_2,F),(\tilde{q}_3,F;\tilde{q}_3,F;\tilde{q}_3,F)\};$$

在$\tilde{\tau}_2$的可达部分自动机${\rm Ac}(\tilde{G}_{\rm V},\tilde{\tau}_2)$中存在环

$$\{(\tilde{q}_5,N^{0.2};\tilde{q}_3,F;\tilde{q}_3,F),(\tilde{q}_5,N^{0.2};\tilde{q}_3,F;\tilde{q}_3,F)\},$$

其中最小的$i-\mu F$环为后者, 即$\mu_{1,\tilde{\tau}_2}=0.2$. 同理可得

$$\begin{aligned}
&\tilde{Q}'_2(\tilde{\tau}_2)=\{\tilde{\tau}_2\}\Rightarrow\mu_{2,\tilde{\tau}_2}=0.8,\\
&\tilde{Q}'_1(\tilde{\tau}_3)=\{\tilde{\tau}_3,\tilde{\tau}_4\}\Rightarrow\mu_{1,\tilde{\tau}_3}=0.6,\\
&\tilde{Q}'_2(\tilde{\tau}_3)=\{\tilde{\tau}_3,\tilde{\tau}_5\}\Rightarrow\mu_{2,\tilde{\tau}_3}=0.4.
\end{aligned}$$

由定理1有

$$0.8\lambda =$$

$$\min\{\max\{\mu_{1,\tilde{\tau}_2},\mu_{2,\tilde{\tau}_2}\},\max\{\mu_{1,\tilde{\tau}_3},\mu_{2,\tilde{\tau}_3}\}\} =$$

$$\min\{\max\{0.2,0.8\},\max\{0.6,0.4\}\} \Rightarrow$$

$$\lambda = 0.75,$$

可得$\tilde{G}$对$\tilde{P}_{\tilde{\sigma},i}$, $\tilde{E}_{\mathrm{f}}$具有0.75–协同可预测性.

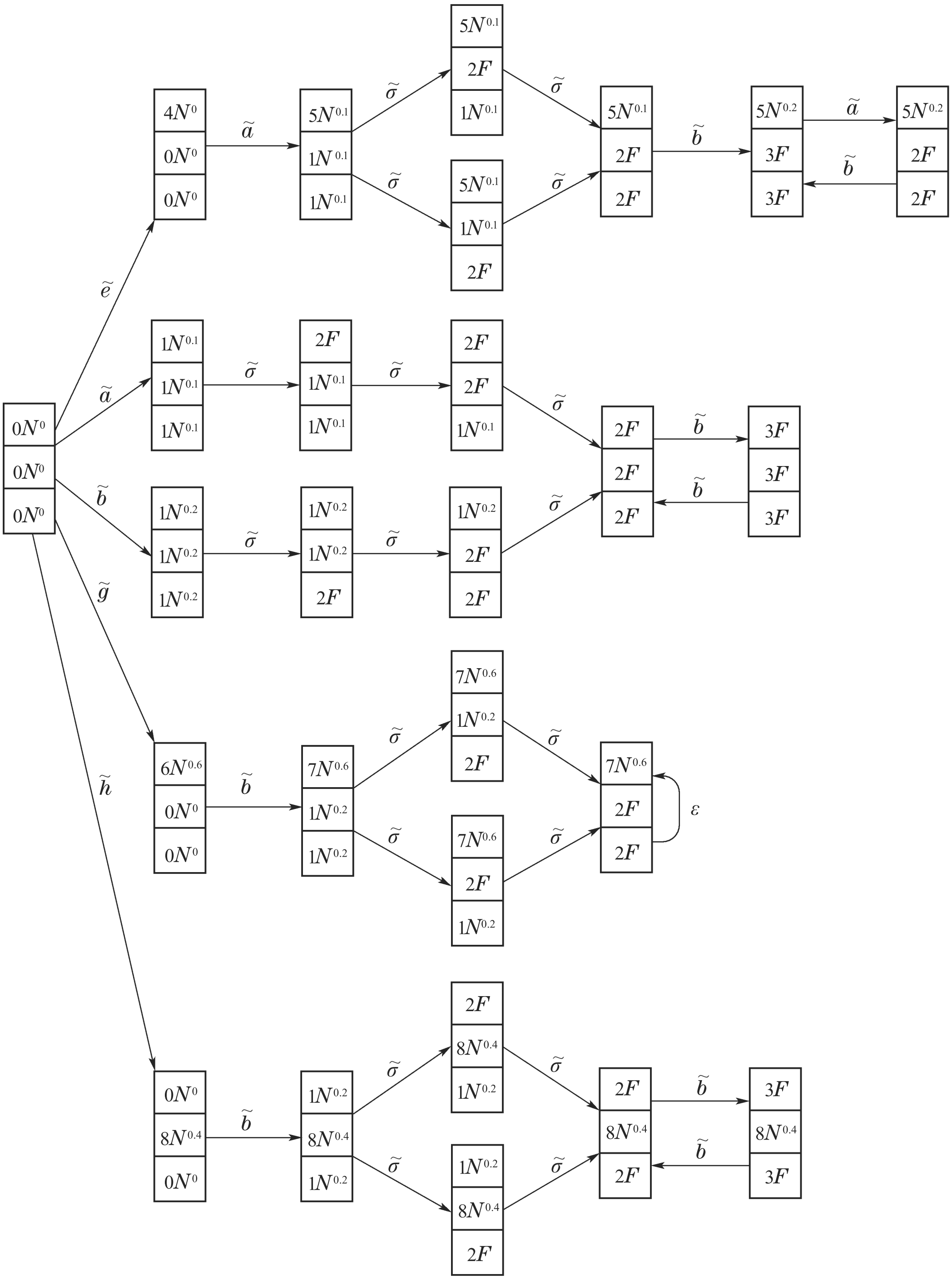

图 2 协同预测验证器$\tilde{G}_{\mathrm{V}}$

Fig. 2 Coprediction verifier $\tilde{G}_{\mathrm{V}}$

5 总结

本文将模糊离散事件系统的故障预测方法推广至分布式系统. 通过多个站点协同预测的方式, 计算系统的λ–协同可预测性, 运用协同预测的方式得到的λ–协同可预测性将不小于单个站点下系统的λ–可预测性, 更准确地描述了分布式模糊离散事件系统的协同可预测性. 后续的研究中, 本文会考虑用Petri网构建协同预测验证器.

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] YOO T S, LAFORTUNE S. Polynomial-time verification of diagnosability of partially observed discrete-event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(9): 1491 – 1495.

[3] CHEN J, KUMAR R. Polynomial test for stochastic diagnosability of discrete event systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(4): 969 – 979.

[4] WEN Ximing, YU Quan, CHANG Liang, et al. Diagnosability of discrete-event systems with uncertain observations. *Journal of Software*, 2017, 28(5): 1091 – 1106.
(文习明, 余泉, 常亮, 等. 不确定观测下离散事件系统的可诊断性. 软件学报, 2017, 28(5): 1091 – 1106.)

[5] WANG Xiaoyu, OUYANG Dantong, ZHAO Xiangfu. Diagnosability of discrete event systems with an incomplete model. *Journal of Software*, 2015, 26(6): 1373 – 1385.
(王晓宇, 欧阳丹彤, 赵相福. 不完备离散事件系统的可诊断性. 软件学报, 2015, 26(6): 1373 – 1385.)

[6] LIU F C, QIU D W. Diagnosability of fuzzy discrete-event systems: A fuzzy approach. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2009, 17(2): 372 – 384.

[7] LIU F C. Polynomial-time verification of diagnosability of fuzzy discrete event systems. *Science China Information Sciences*, 2014, 57(6): 1 – 10.

[8] CAO X. The predictability of discrete event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989, 4(11): 1168 – 1171.

[9] GENC S, LAFORTUNE S. Predictability of event occurrences in partially-observed discrete-event systems. *Automatica*, 2009, 45(2): 301 – 311.

[10] TAKAI S, KUMAR R. Inference-based decentralized prognosis in discrete event systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(1): 165 – 171.

[11] BENMESSAHEL B, TOUAHRIA M, NOUIOUA F. Predictability of fuzzy discrete event systems. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2017, 27(2): 1 – 33.

[12] LIU F. Predictability of failure event occurrences in decentralized discrete-event systems and polynomial-time verification. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, 16(1): 498 – 504.

[13] LIU F. Decentralized predictability of discrete event systems. *The 29th Chinese Control and Decision Conference*. Chongqing, China: IEEE, 2017: 2914 – 2919.

作者简介:

谢仁可 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: 532742740@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;

崔洪刚 讲师, 目前研究方向为大数据与智能计算等研究、离散事件系统监控与故障检测理论与应用, E-mail: cuihg@163.com.