DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.201507041

# 模糊离散事件系统的多故障诊断

刘清兰，王飞，张波业，郭忠宝

（华侨大学 信息科学与工程学院，福建 厦门 361021）

**摘要：** 针对诊断器不能只依赖自身就能判断诊断的缺点，基于不可区分串的概念，提出一种模糊离散事件系统的多故障诊断方法. 首先，基于极小可观测事件构造模糊自动机相应的诊断器，用于寻找不可区分串的集合；其次，根据诊断器的性质，提出模糊离散事件系统的多故障可诊断的充分必要条件；最后，通过实例进行验证. 结果表明：该方法为模糊离散事件系统的多故障诊断提供一种简单可行的新途径.

**关键词：** 模糊离散事件系统；模糊自动机；不可区分串；故障诊断

**中图分类号：** TP 271.8　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-5013(2018)01-00115-06

# Multiple Failures Diagnosability of Fuzzy Discrete Event Systems

LIU Qinglan, WANG Fei, ZHANG Boye, GUO Zhongbao

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In the classical failure diagnosis of discrete event systems, the diagnoser can not rely on itself judgment whether it can be diagnosed, we need to refer to the original system. Aimed at this drawback, in this paper, the multiple failures diagnosability is proposed based on the concept of undistinguishable strings in the fuzzy discrete event systems. Firstly, we construct the diagnoser with respect to the minimal observable event corresponding to fuzzy automaton to find sets of undistinguishable strings. Secondly, according to the properties of the diagnose, a necessary and sufficient condition for multiple failures diagnosability of fuzzy discrete event systems is put forward. Finally, the experimental results show that the proposed method is an effective and simple approach for multiple failures diagnosability of fuzzy discrete event systems.

**Keywords:** fuzzy discrete event systems; fuzzy automaton; undistinguishable strings; multiple failures diagnosis

在自动化生产领域和大量的人造系统中，因设备故障而引起的灾难性事故频繁发生，这些故障具有异步性、离散化和事件驱动的特点. 因此，研究一种针对离散化故障事件的理论方法和体系，是刻不容缓的[1-2]. 1995 年，Sampath 等[3]针对逻辑离散事件系统，提出了基于有限自动机模型的诊断器理论[4]. 由于现实中大量的系统具有模糊属性，Lin 等[5-6]结合模糊集理论[7]，将经典的离散事件系统理论扩展到模糊离散事件系统. Kilic 等[8-9]基于模糊 IF-THEN 规则，研究了模糊离散事件系统的监控和故障诊断. 随后，Qiu 等[10-12]基于 max-min 形式的模糊离散事件系统，讨论了故障诊断问题. Wang 等[13]利用格值模糊自动机的特性，构造了一种新的故障诊断器. 为了解决模糊离散事件系统部分可诊断性问题，陆伟等[14]提出一种系统部分可诊断性的量化评价方法. Luo 等[15]基于不可区分串的概念，提出了新的模糊离散事件系统可诊断的概念和可诊断的充要条件，并将这一套方法成功地应用于动物疾病的治疗案例. 基于此，本文将单故障类型的故障诊断方法推广到有多个故障类型的故障诊断.

**收稿日期：** 2015-07-28

**通信作者：** 王飞(1977-)，男，副教授，博士，主要从事离散事件系统、资源优化配置的研究. E-mail：feiw545@163.com.

**基金项目：** 国家自然科学基金资助项目(61203040)

# 1 模糊离散事件系统

将诊断对象建模为一个模糊有限自动机(max-min 自动机)[16],即

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

上式中:$\tilde{G}$ 为有限模糊状态集;$\tilde{\Sigma}$ 为模糊事件集;$\tilde{q}_0$ 为初始模糊状态;状态转移函数 $\tilde{\delta}: \tilde{Q}\times\tilde{\Sigma}\to\tilde{Q}$ 定义为 $\tilde{\delta}(\tilde{q},\tilde{\sigma})=\tilde{q}\odot\tilde{\sigma}$,$\odot$是模糊集合论中的最大最小运算(max-min operation).

**定义 1**[10] 对于 $\tilde{\sigma}\in\tilde{\Sigma}$,记

$$\tilde{Q}_{\tilde{\sigma}} = \{\tilde{q}_0\} \cup \{\tilde{q} \in \tilde{Q} : (\exists \tilde{q}' \in \tilde{Q})(\exists \tilde{\alpha} \in \tilde{\Sigma}_{\tilde{\sigma}})\tilde{\delta}(\tilde{q}', \tilde{\alpha}) = \tilde{q}\},$$

其中,$\tilde{\Sigma}_{\tilde{\sigma}} = \tilde{\Sigma}_{\max\_o} \cup \{\tilde{\alpha} \in \tilde{\Sigma} : \tilde{\Sigma}_o(\tilde{\sigma}) > \tilde{\Sigma}_o(\tilde{\sigma})\}$.

$\tilde{Q}_{\tilde{\sigma}}$ 包括初始状态及所有经过一个最大可观测度事件(或可观测度大于事件 $\tilde{\sigma}$ 的事件)可以达到的状态.

**定义 2** $L(\tilde{q}) = \{\tilde{s} \in L(\tilde{G}) : \delta(\tilde{q},\tilde{s})!\}$;$L_0(\tilde{q},\tilde{\sigma}) = \{\tilde{s} \in L(\tilde{q}) : \tilde{s} = \tilde{u}\tilde{\alpha}, \tilde{\alpha} \in : \tilde{\Sigma}_{\tilde{\sigma}}, \tilde{\Sigma}_0(\tilde{\sigma}) \geqslant \tilde{M}_0(\tilde{u})\}$;$L_{\tilde{\theta}}(\tilde{q},\tilde{\sigma}) = \{\tilde{s} \in L_0(\tilde{q},\tilde{\sigma}) : \tilde{s}_f = \tilde{\theta}\}$. 其中,$\tilde{M}_0(\tilde{u}) = \max\{\tilde{\Sigma}_0(\tilde{\theta}_i) : \tilde{u} = \tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \cdots, \tilde{\theta}_n\}$;$L(\tilde{q})$表示从状态 $\tilde{q}$ 出发的所有串的集合;$L_0(\tilde{q},\tilde{\sigma})$表示在 $L(\tilde{q})$中,只有最后一个事件对于事件 $\tilde{\sigma}$ 为可观测事件的串的集合;$L_{\tilde{\theta}}(\tilde{q},\tilde{\sigma})$表示 $L_0(\tilde{q},\tilde{\sigma})$中最后一个事件为 $\tilde{\theta}$ 的串的集合.

假设模糊离散事件系统 $\tilde{G}$ 中有 $m$ 个故障,$\Delta_f=\{f_1, f_2, \cdots, f_m\}$,每个故障都以一定的可能性发生在每一个事件上,记 $\tilde{\Sigma}_{f_i}=\{\tilde{\sigma}\in\tilde{\Sigma} : \tilde{\Sigma}_{f_i}(\tilde{\sigma})\geqslant 0\}$,$i=1,2,\cdots,m$,$\tilde{\Sigma}_{f_i}$ 表示事件 $\tilde{\sigma}$ 对于故障 $f_i$ 可能的错误程度[15]. 基于不可区分串的概念,定义 3 为模糊离散事件系统的多故障可诊断定义.

**定义 3** 设模糊离散事件系统 $\tilde{G}$ 中有 $m$ 个故障,$\Delta_f=\{f_1, f_2, \cdots, f_m\}$,$L(\tilde{G})$是由模糊离散事件系统 $\tilde{G}$ 产生的具有前缀闭包性语言. 对于每一个故障 $f_i(i=1,2,\cdots,m)$,定义模糊 $f_i$ 可诊断函数 $FD^i$ : $L^\infty/\approx\to[0,1]$. 对于任意的 $L^\infty_{\tilde{\omega}_k}\in L^\infty/\approx$,有

$$\mathrm{FD}^i(L^\infty_{\tilde{\omega}_k}) = \begin{cases} \dfrac{\min\{\tilde{\Sigma}_{f,i}(\tilde{\omega}) : \tilde{\omega} \in L^\infty_{\tilde{\omega}_k}\}}{\max\{\tilde{\Sigma}_{f,i}(\tilde{\omega}) : \tilde{\omega} \in L^\infty_{\tilde{\omega}_k}\}}, & \max\{\tilde{\Sigma}_{f,i}\tilde{\omega} : \tilde{\omega} \in L^\infty_{\tilde{\omega}_k}\} \neq 0, \\ 1, & \text{其他}. \end{cases}$$

若 $\lambda_i=\bigwedge_{k\in K}\mathrm{FD}^i(L^\infty_{\tilde{\omega}_k})$,则称 $L$ 是$\{f_1,\cdots,f_m\}$-$\{\lambda_1,\cdots,\lambda_m\}$可诊断的.

**定义 4** 模糊离散事件系统 $\tilde{G}$ 中有限故障集 $\Delta_f=\{f_1, f_2, \cdots, f_m\}$,$\tilde{\Delta}_f$ 为 $\Delta_f$ 上的模糊集,即

$$\tilde{\Delta}_f = \frac{\lambda_1}{f_1} + \frac{\lambda_2}{f_2} + \cdots + \frac{\lambda_m}{f_m},$$

$\lambda_i$ 为故障 $f_i$ 的隶属度,则称 $\tilde{\Delta}_f$ 为模糊离散事件系统 $\tilde{G}$ 的故障可诊断程度集.

# 2 模糊离散事件系统诊断器的构造

为了寻找不可区分串,只需确定事件串对任意极小可观测事件 $\tilde{\sigma}\in\tilde{\Sigma}$ 是否具有相同的可观测行为. 因此,只要针对任一极小可观测事件构造其诊断器,就能找到所有的不可区分串.

记极小可观测事件为 $\tilde{\sigma}$,构造诊断器 $\tilde{G}^{\mathrm{d}}_{\tilde{\sigma}}$,诊断器是一个有限自动机,即

$$\tilde{G}^{\mathrm{d}}_{\tilde{\sigma}} = (\tilde{Q}^{\mathrm{d}}_{\tilde{\sigma}}, \tilde{\Sigma}^{\mathrm{d}}_{\tilde{\sigma}}, \tilde{\delta}^{\mathrm{d}}_{\tilde{\sigma}}, \tilde{\rho}_0).$$

$\tilde{Q}^{\mathrm{d}}_{\tilde{\sigma}}$ 是诊断器的有限状态空间:$\tilde{Q}^{\mathrm{d}}_{\tilde{\sigma}}\subseteq 2^{\tilde{Q}_{\tilde{\sigma}}\times I}$,其中,$I=I_1\times I_2\times\cdots\times I_m$. 对于每个 $i=1,2,\cdots,m$,$I_i=\{0\}\cup\{\tilde{\Sigma}_{f_i}\tilde{\alpha}\in\tilde{\Sigma}\}$. $\tilde{Q}^{\mathrm{d}}_{\tilde{\sigma}}$ 的状态为

$$\tilde{\rho} = \{(\tilde{q}_1, (l_{1,1}, l_{1,2}, \cdots, l_{1,m})), (\tilde{q}_2, (l_{2,1}, l_{2,2}, \cdots, l_{2,m})), \cdots, (\tilde{q}_t, (l_{t,1}, l_{t,2}, \cdots, l_{t,m}))\},$$

其中,$l_{j,i}$用于标记状态 $q_j$ 已经发生的故障 $f_i$ 的错误程度. 为了方便起见,记

$$\boldsymbol{V}_j = (l_{j,1}, l_{j,2}, \cdots, l_{j,m}),$$

则状态也可以表示为

$$\tilde{\rho} = \{(\tilde{q}_1, \boldsymbol{V}_1),\ (\tilde{q}_2, \boldsymbol{V}_2), \cdots, (\tilde{q}_t, \boldsymbol{V}_t)\},$$

$(\tilde{q}_j, \boldsymbol{V}_j)(j=1,2,\cdots,t)$称为状态 $\tilde{\rho}$ 的组成部分.

诊断器的初始状态为 $\tilde{\rho}_0=\{(\tilde{q}_0, (\overbrace{0,\cdots,0}^{m})\}$,表示系统从无故障状态开始. $\tilde{\Sigma}^{\mathrm{d}}_{\tilde{\sigma}}$ 是诊断器的有限事件

集：$\tilde{\Sigma}_{\sigma}^{\mathrm{d}}=\tilde{\Sigma}_{\tilde{\sigma}}$. 诊断器的状态转移函数 $\tilde{\delta}_{\sigma}^{\mathrm{d}}:\tilde{Q}_{\sigma}^{\mathrm{d}}\times\tilde{\Sigma}_{\sigma}^{\mathrm{d}}\to\tilde{Q}_{\sigma}^{\mathrm{d}}$.

首先，定义标识传播函数 $\mathrm{LP}:\tilde{Q}_{\sigma}\times I\times\Sigma^{*}\to I$：，对于 $\tilde{q}_j\in\tilde{Q}_{\tilde{\sigma}}$，$\boldsymbol{V}_j\in I$，$\tilde{s}\in\tilde{\Sigma}^{*}$，$\mathrm{LP}((\tilde{q}_j,(l_{j,1},l_{j,2}\cdots,l_{j,m})),\tilde{s})=(\max\{\tilde{\Sigma}_{f_1}(\tilde{s}),l_{j,1}\},\max\{\tilde{\Sigma}_{f_2}(\tilde{s}),l_{j,2}\},\cdots,\max\{\tilde{\Sigma}_{f_m}(\tilde{s}),l_{j,m}\})$.

其次，记可达状态集为

$$\tilde{\rho}_{\max}(\tilde{\rho},\tilde{\alpha})=\bigcup_{(\tilde{q}_j,\tilde{l}_j)\in\tilde{\rho}}\bigcup_{\tilde{s}\in L_{\tilde{\alpha}}(\tilde{q}_j,\tilde{\sigma})}\{(\tilde{\delta}(\tilde{q}_j,\tilde{s}),\mathrm{LP}(\tilde{q}_j,\boldsymbol{V}_j,\tilde{s}))\}.$$

令下一个状态的组成个数不小于当前状态的组成个数，则有 $\tilde{D}(\tilde{\rho}_{\max})=\{\tilde{\rho}'\subseteq\tilde{\rho}_{\max}:|\tilde{\rho}'|\geqslant|\tilde{\rho}|\}$. 其中，$|\tilde{\rho}|$ 表示状态 $\tilde{\rho}$ 的组成个数.

最后，对所有的 $\tilde{\rho}'\in\tilde{D}(\tilde{\rho}_{\max})$，定义 $\tilde{\delta}_{\sigma}^{\mathrm{d}}(\tilde{\rho},\tilde{\alpha})=\tilde{\rho}'$.

## 3　模糊离散事件系统可诊断的判断方法

由不可区分串和循环定义可知[15]，诊断器 $\tilde{G}_{\sigma}^{\mathrm{d}}$ 中存在一个错误程度为 $((l_{1,1},l_{1,2},\cdots,l_{1,m}),(l_{2,1},l_{2,2},\cdots,l_{2,m}),(l_{n,1},l_{n,2},\cdots,l_{n,m}))$ 循环，当且仅当系统 $\tilde{G}$ 产生的语言中存在不可区分串的集合 $L_{\tilde{\omega}}^{\infty}$ 对所有 $\tilde{\omega}_k\in L_{\tilde{\omega}}^{\infty}$，$1,2,\cdots,n$，有 $(\tilde{\omega}_k,\tilde{\omega})\in\approx$，$\tilde{\omega}_k$ 的错误程度为 $(l_{k,1},l_{k,2},\cdots,l_{k,m})$.

模糊离散事件系统 $\tilde{G}$ 产生的语言中不可区分串的集合 $L_{\tilde{\omega}}^{\infty}$ 与诊断器 $\tilde{G}_{\sigma}^{\mathrm{d}}$ 中的循环一一对应，利用诊断器中的循环便可以寻找到不可区分串的集合. 因此，基于不可区分串的模糊诊断概念可以通过诊断器中的循环来实现系统可诊断程度的判断. 基于定义 3，利用诊断器中的循环可求得模糊离散事件系统 $\tilde{G}$ 的故障可诊断程度集，具体有如下 3 个步骤.

**步骤 1**　假设诊断器 $\tilde{G}_{\sigma}^{\mathrm{d}}$ 中存在 $K$ 个循环，第 $k$ 个循环的错误程度为

$$(l_{1,1}^{k},l_{1,2}^{k},\cdots,l_{1,m}^{k}),(l_{2,1}^{k},l_{2,2}^{k},\cdots,l_{2,m}^{k}),\cdots,(l_{n,1}^{k},l_{n,2}^{k},\cdots,l_{n,m}^{k}),\qquad k=1,2,\cdots,K,$$

则第 $k$ 个循环的错误程度矩阵 $\boldsymbol{V}^{k}$ 为

$$\boldsymbol{V}^{k}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{V}_1^{k}\\\boldsymbol{V}_2^{k}\\\vdots\\\boldsymbol{V}_n^{k}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}f_1 & f_2 & \cdots & f_m\\ l_{1,1}^{k} & l_{1,2}^{k} & \cdots & l_{1,m}^{k}\\ l_{2,1}^{k} & l_{2,2}^{k} & \cdots & l_{2,m}^{k}\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ l_{n,1}^{k} & l_{n,2}^{k} & \cdots & vl_{n,m}^{k}\cdots\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\tilde{q}_1\\\tilde{q}_2\\\vdots\\\tilde{q}_n.\end{bmatrix}.$$

**步骤 2**　根据第 $k$ 个循环的错误程度矩阵 $\boldsymbol{V}^{k}$，计算第 $k$ 个循环的可诊断程度向量为

$$\boldsymbol{P}_{\min}^{k}\bigcap_{i=1}^{n}\boldsymbol{V}_i^{k}=\boldsymbol{V}_1^{k}\cap\boldsymbol{V}_2^{k}\cap\cdots\cap\boldsymbol{V}_n^{k},$$

$$\boldsymbol{P}_{\max}^{k}\bigcap_{i=1}^{n}\boldsymbol{V}_i^{k}=\boldsymbol{V}_1^{k}\cap\boldsymbol{V}_2^{k}\cap\cdots\cap\boldsymbol{V}_n^{k}.$$

设 $\boldsymbol{P}_{\min}^{k}=[a_1\cdots a_m]_{1\times m}$ 和 $\boldsymbol{P}_{\max}^{k}=[b_1\cdots b_m]_{1\times m}$，则

$$r_i^{k}=\begin{cases}a_i/b_i, & b_i\neq0,\\1, & b_i=0.\end{cases}$$

上式中：$r_i^{k}(i=1,2,\cdots,m)$ 表示第 $k$ 个循环的第 $i$ 个故障的可诊断程度.

因此，第 $k$ 个循环的可诊断程度向量可以表示为

$$\boldsymbol{P}^{k}=[r_1^{k}\cdots r_m^{k}]_{1\times m}.$$

**步骤 3**　$k$ 从 1 取到 $K$，最后得到模糊离散事件系统 $\tilde{G}$ 的可诊断程度向量为

$$\boldsymbol{R}^{k}=[r_1\cdots r_m]_{1\times m}=\bigcap_{k=1}^{K}\boldsymbol{R}^{k}.$$

上式中：$r_1(i=1,2,\cdots,m)$ 表示模糊离散事件系统 $\tilde{G}$ 的第 $i$ 个故障的可诊断程度. 记故障可诊断程度集为 $\tilde{\Delta}_f=\frac{r_1}{f_1}+\frac{r_2}{f_2}+\cdots+\frac{r_m}{f_m}$. 其中，$\tilde{\Delta}_f$ 为 $\Delta_f$ 上的模糊集，$r_m$ 为故障 $f_m$ 的隶属度.

综上所述，可以得到模糊离散事件系统的多故障可诊断的充分必要条件，即

**定理 1**　假设模糊离散事件系统 $\tilde{G}$ 有多个故障 $\Delta_f=\{f_1,f_2,\cdots,f_m\}$，系统产生的语言为 $L(\tilde{G})$，基于极小可观测事件 $\tilde{\sigma}$ 构造诊断器为 $\tilde{G}_{\sigma}^{\mathrm{d}}$. 那么，$L$ 是 $\{f_1,\cdots,f_m\}$-$\{\lambda_1,\cdots,\lambda_m\}$ 可诊断的充分必要条件是诊

断器中存在 $K$ 个循环,错误程度为

$$(l^k_{1,1},l^k_{1,2},\cdots,l^k_{1,m}),(l^k_{2,1},l^k_{2,2},\cdots,l^k_{2,m}),\cdots,(l^k_{n,1},l^k_{n,2},\cdots,l^k_{n,m}),\qquad k=1,2,\cdots,K.$$

使模糊离散事件系统 $\widetilde{G}$ 的故障可诊断程度集为

$$\widetilde{\Delta}_f=\frac{r_1}{f_1}+\frac{r_2}{f_2}+\cdots+\frac{r_m}{f_m}$$

成立,其中 $r_i=\lambda_i(i=1,2,\cdots,m)$.

证明 1) 必要性. $L$ 是$\{f_1,\cdots,f_m\}$-$\{\lambda_1,\cdots,\lambda_m\}$可诊断,在 $L$ 中有 $K$ 个不可区分串的集合 $L^{\infty}_{\tilde{\omega}_k}(k=1,\cdots,K)$. 根据定义 3,对于任意一个故障 $f_i(i=1,2,\cdots,m)$,有

$$\lambda_i=\bigwedge_{k\in K}\frac{\min\{\widetilde{\Sigma}_{f,i}(\tilde{\omega}):\tilde{\omega}\in L^{\infty}_{\tilde{\omega}_k}\}}{\max\{\widetilde{\Sigma}_{f,i}(\tilde{\omega}):\tilde{\omega}\in L^{\infty}_{\tilde{\omega}_k}\}}.$$

由于不可区分串的集合与循环一一对应,从而诊断器中存在 $K$ 个循环,第 $i$ 个故障的错误程度为

$$(l^k_{1i},l^k_{2i},\cdots,l^k_{ni}),\qquad k=1,2,\cdots,K.$$

由步骤 1~3,可得

$$r_i=\bigwedge_{k=1}^{K}r^k_i=\bigwedge_{k=1}^{K}\frac{\min\{l^k_{1,i},l^k_{2,i},\cdots,l^k_{n,i}\}}{\max\{l^k_{1,i},l^k_{2,i},\cdots,l^k_{n,i}\}}=\bigwedge_{k=1}^{K}\frac{\min\{\widetilde{\Sigma}_{f,i}(\tilde{\omega}):\tilde{\omega}\in L^{\infty}_{\tilde{\omega}_k}\}}{\max\{\widetilde{\Sigma}_{f,i}(\tilde{\omega}):\tilde{\omega}\in L^{\infty}_{\tilde{\omega}_k}\}}=\lambda_i.$$

因此,系统 $\widetilde{G}$ 的故障可诊断程度集为

$$\widetilde{\Delta}_f=\frac{r_1}{f_1}+\frac{r_2}{f_2}+\cdots+\frac{r_m}{f_m},$$

其中,$r_i=\lambda_i(i=1,2,\cdots,m)$.

2) 充分性. 如果在诊断器中存在 $K$ 个循环,错误程度为

$$(l^k_{1,1},l^k_{1,2},\cdots,l^k_{1,m}),(l^k_{2,1},l^k_{2,2},\cdots,l^k_{2,m}),\cdots,(l^k_{n,1},l^k_{n,2},\cdots,l^k_{n,m}),\qquad k=1,2,\cdots,K,$$

使得模糊离散事件系统 $\widetilde{G}$ 的故障模糊集为

$$\widetilde{\Delta}_f=\frac{r_1}{f_1}+\frac{r_2}{f_2}+\cdots+\frac{r_m}{f_m}.$$

由于不可区分串的集合与循环一一对应,那么 $L$ 中有 $K$ 个不可区分串的集合 $L^{\infty}_{\tilde{\omega}_k}(k=1,\cdots,K)$,对于任意一个故障 $f_i(i=1,\cdots,m)$,有

$$\lambda_i=\bigwedge_{k\in K}\frac{\min\{\widetilde{\Sigma}_{f,i}(\tilde{\omega}):\tilde{\omega}\in L^{\infty}_{\tilde{\omega}_k}\}}{\max\{\widetilde{\Sigma}_{f,i}(\tilde{\omega}):\tilde{\omega}\in L^{\infty}_{\tilde{\omega}_k}\}}=\bigwedge_{k\in K}\frac{\min\{l^k_{1,i},l^k_{2,i},\cdots,l^k_{n,i}\}}{\max\{l^k_{1,i},l^k_{2,i},\cdots,l^k_{n,i}\}}=\bigwedge_{k\in K}\frac{\boldsymbol{P}^{k,i}_{\min}}{\boldsymbol{P}^{k,i}_{\max}}=\bigwedge_{k\in K}r^k_i=r_i.$$

因此,$L$ 是$\{f_1,\cdots,f_m\}$-$\{\lambda_1,\cdots,\lambda_m\}$可诊断的. 证毕.

**推论 1** 当系统 $\widetilde{G}$ 中只有一个故障($m=1$)时,定理 1 即为文献[15]中的定理 3.

**推论 2** 如果 $\lambda_i=0$(即 $a_i=0$ 且 $b_i\neq0$),那么称 $L$ 是 $f_i$-完全不可诊断的(或者称对于故障 $f_i$,$L$ 的可诊断程度为 0);如果诊断器中不存在关于故障 $f_i$ 的循环,或者 $\lambda_i=1$,那么称 $L$ 是 $f_i$-完全可诊断的(或者称对于故障 $f_i$,$L$ 的可诊断程度为 1).

**推论 3** 若诊断器中不存在循环,则对于所有的故障 $f_i(i=1,2,\cdots,m)$,系统 $\widetilde{G}$ 是完全可诊断的.

## 4 两种诊断方法的比较

令 $\widetilde{G}=(\widetilde{Q},\widetilde{\Sigma},\tilde{\delta},\tilde{q}_0)$为模糊离散事件系统,$\widetilde{G}^{\mathrm{d}}_{\sigma}=(\widetilde{Q}^{\mathrm{d}}_{\sigma},\widetilde{\Sigma}^{\mathrm{d}}_{\sigma},\tilde{\delta}^{\mathrm{d}}_{\sigma},\tilde{\rho}_0)$为基于极小可观测事件 $\tilde{\sigma}$ 所构造的诊断器,$|\widetilde{Q}|$和$|\widetilde{\Sigma}|$分别为模糊离散事件系统 $\widetilde{G}$ 的状态个数和事件个数,故障划分为 $m$ 个类型. 对文献[10]中提出的方法和文中提出的方法进行的比较,如表 1 所示.

表 1 两种方法的比较

Tab. 1 Comparison of two methods

| 参数 | 文献[10]提出的方法 | 文中提出的方法 |
| --- | --- | --- |
| 是否需要参考初始系统 | 是 | 否 |
| 需要构造的诊断器个数 | $\lvert\widetilde{\Sigma}\rvert$ | 1 |
| 验证可诊断条件的复杂性 | $O(2^{\lvert\widetilde{\Sigma}\rvert\times m(\lvert\widetilde{\Sigma}\rvert)+1}\times\lvert\widetilde{\Sigma}\rvert^2)$ | $O(2^{\lvert\widetilde{\Sigma}\rvert\times m(\lvert\widetilde{\Sigma}\rvert)+1}\times\lvert\widetilde{\Sigma}\rvert)$ |

## 5　实例验证

模糊离散事件系统 $\widetilde{G}$，如图 1 所示. 系统包含两种故障 $F_1$ 和 $F_2$，事件的可观测程度和故障发生在这些事件的可能性分别为

$$\widetilde{\Sigma}_0(\widetilde{\alpha})=0.5,\quad \widetilde{\Sigma}_0(\widetilde{\beta})=0.4,$$
$$\widetilde{\Sigma}_0(\widetilde{\gamma})=0.6,\quad \widetilde{\Sigma}_0(\widetilde{\theta})=0.3,$$
$$\widetilde{\Sigma}_{f_1}(\widetilde{\alpha})=0.1,\quad \widetilde{\Sigma}_{f_1}(\widetilde{\beta})=0.2,$$
$$\widetilde{\Sigma}_{f_1}(\widetilde{\gamma})=0.3,\quad \widetilde{\Sigma}_{f_1}(\widetilde{\theta})=0.4,$$
$$\widetilde{\Sigma}_{f_2}(\widetilde{\alpha})=0.3,\quad \widetilde{\Sigma}_{f_2}(\widetilde{\beta})=0.4,$$
$$\widetilde{\Sigma}_{f_2}(\widetilde{\gamma})=0.2,\quad \widetilde{\Sigma}_{f_2}(\widetilde{\theta})=0.2.$$

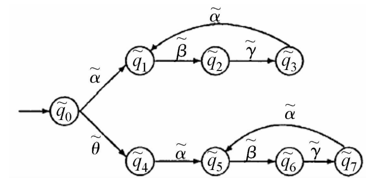
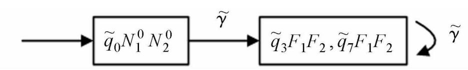


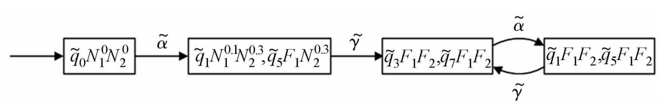

图 1　模糊离散事件系统 $\widetilde{G}$

Fig. 1　Fuzzy discrete event systems $\widetilde{G}$

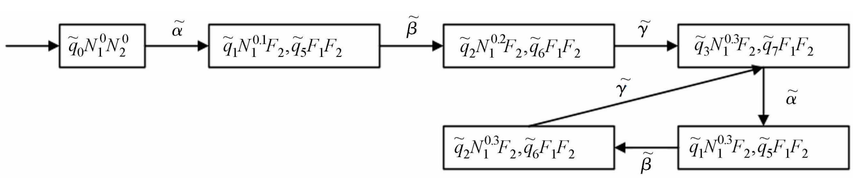
采用文献[10]提出的方法，关于 $\widetilde{\alpha}$，$\widetilde{\beta}$，$\widetilde{\gamma}$，$\widetilde{\theta}$ 的诊断器，如图 2 所示. 对于故障 $f_1$，关于 $\widetilde{\alpha}$，$\widetilde{\beta}$ 和 $\widetilde{\gamma}$ 的诊断器都不存在 $F_1$-不确定环，但在关于 $\widetilde{\theta}$ 的诊断器中，存在一个极小 0.3-$F_1$-不确定环. 由于 $\widetilde{\Sigma}_{f_1}(\widetilde{\theta})=0.4$，则对于故障 $f_1$，$L$ 的可诊断程度是 0.75. 对于故障 $f_2$，关于 $\widetilde{\alpha}$，$\widetilde{\beta}$，$\widetilde{\gamma}$ 和 $\widetilde{\theta}$ 的诊断器都不存在 $F_1$-不确定环，则对于故障 $f_2$，$L$ 是完全可诊断的.




(a) 关于 $\widetilde{\alpha}$ 和 $\widetilde{\gamma}$ 的诊断器




(b) 关于 $\widetilde{\beta}$ 的诊断器




(c) 关于 $\widetilde{\theta}$ 的诊断器

图 2　关于每个 $\widetilde{\sigma}\in\widetilde{\Sigma}_{\text{fail}}$ 的诊断器

Fig. 2　Diagnosers with respect to each $\widetilde{\sigma}\in\widetilde{\Sigma}_{\text{fail}}$

基于极小可观测事件 $\widetilde{\theta}$ 构造诊断器，如图 3 所示.

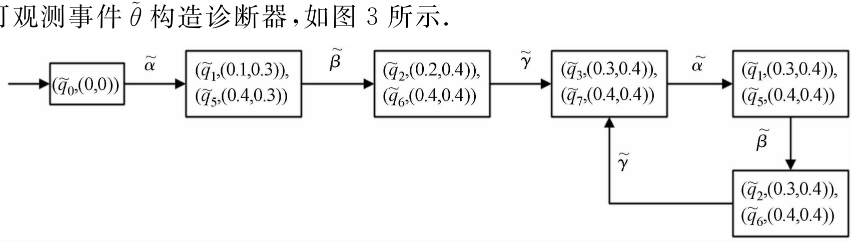



图 3　诊断器 $\widetilde{G}_{\theta}^{\mathrm{d}}$

Fig. 3　Diagnosers $\widetilde{G}_{\theta}^{\mathrm{d}}$

由图 3 可知：$\widetilde{G}_{\theta}^{\mathrm{d}}$ 中存在一个循环(即 $K=1$)，错误程度为(0.3，0.4)，(0.4，0.4). 由步骤 1～3，可得 $\Delta_f$ 上的模糊集为 $\widetilde{\Delta}_f=\dfrac{r_1}{f_1}+\dfrac{r_2}{f_2}=\dfrac{0.75}{f_1}+\dfrac{1}{f_2}$.

因此，由定理 1 可知，$\lambda_1=r_1=0.75$，$\lambda_2=r_2=1$，$L$ 是$(f_1,f_2)$-(0.75，1.00) 是可诊断的.

## 6　结束语

在文献[15]的基础上，提出了模糊离散事件系统的多故障诊断方法，对于模糊离散事件系统 $\widetilde{G}$，基于极小可观测事件构造诊断器 $\widetilde{G}_{\sigma}^{\mathrm{d}}$，用于寻找不可区分串的集合. 不可区分串的集合和诊断器中的循环

是一一对应的，只要通过诊断器中的循环就可以判断系统的可诊断程度.文中提出的方法更加简单、容易理解，便于编程，且不需要依赖初始系统.根据诊断器自身就能完成可诊断程度的判断，为模糊离散事件系统的多故障诊断提供了一种有效的、易于操作的新途径.

## 参考文献:

[1] 吴旋.基于离散事件动态系统的故障诊断理论的研究[D].杭州:浙江大学，2002:1-35.

[2] BAVSHI S, CHONG E K P. Automated fault diagnosis of using a discrete event systems framework[J]. IEEE International Symposium on Intelligent Control, 1994(6):213-218. DOI:10.1109/isic.1994.367815 .

[3] SAMPATH M, SENGUPTA R, LAFORTUNE S, *et al*. Diagnosability of discrete-event systems[C]//IEEE Transactions on Automatic Control. New York: IEEE Press: 1555-1575. DOI:10.1007/bfb0033534.

[4] 郑大钟，郑应平.离散事件动态系统理论、现状和展望[J].自动化学报，1992，189(2):129-142.

[5] LIN Feng, YING Hao. Modeling and control of fuzzy discrete even systems[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Cybernetics, 2002, 32(9):408-415. DOI:10.1109/tsmcb.2002.1018761.

[6] LIN Feng, YING Hao. Fuzzy discrete event systems and their observability[C]//Ifsa World Congress and, Nafips International Conference. Vancouver: IEEE Press, 2001:1271-1276. DOI:10.1109/nafips.2001.943730.

[7] ZADEH L A. Fuzzy sets [J]. Information and Control, 1965, 8(3):338-353. DOI:10.21236/ad0608981.

[8] KILIE E. Diagnosability of fuzzy discrete event systems[J]. Information Sciences, 2008, 178(3):858-870. DOI:10.1016/j.ins.2007.09.009.

[9] 毕翔，韩江洪.模糊离散事件系统的自适应监督控制[J].仪器仪表学报，2013，34(10):2170-2176.

[10] LIU Fuchun, QIU Daowen. Diagnosability of fuzzy discrete-event systems: A fuzzy approach[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2009, 17(2):372-384. DOI:10.1109/tfuzz.2009.2013840.

[11] LIU Fuhun, ZHANG Qianheng, HUANG Renwei. A polynomial verification algorithm for safe diagnosability of fuzzy discrete-event systems[C]//IEEE Control Conference. Nanjing: IEEE Press, 2014:3915-3920. DOI:10.1109/chicc.2014.6895592.

[12] LIU Fuchun. Safe diagnosability of fuzzy discrete-event systems and a polynomial-time verification[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(5):1534-1544. DOI:10.1109/tfuzz.2014.2362767.

[13] WANG Shuai, JI Yindong. A novel fault diagnosis framework of computing with words based on lattice-valued fuzzy automata[C]//Proceeding of the 5th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. Changsha: IEEE Press, 2013:62-66. DOI:10.1109/icmtma.2013.27.

[14] 陆伟，张龙妹，朱怡安.离散事件系统部分可诊断性分析[J].计算机科学，2015，42(2):177-181. DOI:10.11896/j.issn.1002-137X.2015.2.038.

[15] LUO Minman, LI Yongming. A new algorithm for the diagnosability of fuzzy discrete event systems[J]. Information Sciences, 2012, 185(1):100-113. DOI:10.1016/j.ins.2011.08.023.

[16] QIU Daowen, LIU Fuchun. Fuzzy discrete event systems under fuzzy observability and a test algorithm[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2009, 17(3):578-589. DOI:10.1109/tfuzz.2005.864085.

(**责任编辑:** 陈志贤　　**英文审校:** 吴逢铁)