

# 柔性制造系统的部分可观时间 Petri 网故障诊断

张治国,刘久富,郑 锐

(南京航空航天大学 自动化学院,江苏 南京 210016)

**摘 要:**研究了 Petri 网在柔性制造系统中的故障诊断问题。针对柔性制造系统中工业机器人故障率高且部分关键信息无法通过传感器获取的问题,利用时间 Petri 网在实时系统中的重要作用,结合部分可观时间 Petri 网和状态类图 (state class graph, SCG),提出构建修正状态类图 (modified state class graph, MSCG) 的方法。首先根据执行机构是否可观分为可观测变迁和不可观测变迁并结合变迁触发关系 (同步、异步) 修正各变迁时间区间建立系统的修正状态类图 (MSCG)。然后根据提出的故障诊断算法,寻找所有满足可观测变迁触发时间和序列信息的路径,判断所有路径组成的集合是否包含故障变迁,诊断系统是否发生故障。最后以某柔性制造系统为例,结合零件加工过程中各执行机构可观测状态,建立 Petri 网模型,对系统不可观部分进行故障诊断,验证了算法的有效性。

**关键词:**时间 Petri 网;部分可观;故障诊断;柔性制造系统

**中图分类号:**TP391

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2018)10-0083-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2018.10.017

## Fault Diagnosis of Flexible Manufacturing System Using Partially Observed Time Petri Nets

ZHANG Zhi-guo, LIU Jiu-fu, ZHENG Rui

(School of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The fault diagnosis of flexible manufacturing system (FMS) is researched. Aiming at the high failure rate of industrial robots in FMS and some key information not obtained through the sensors, we present a method of building modified state class graph (MSCG) based on partially observed time Petri nets (POTPN) and state class graph (SCG). Firstly, the transitions are divided into observable and unobservable transitions according to the observability of the actuators, and the time intervals are modified based on the different relationship of the transitions (synchronization and asynchronous). The modified state class graph are built with time Petri nets. Then, finding all paths that are effective based on the algorithm presented and the firing time of observed transitions to determine whether the effective paths have fault transitions. Finally, taking a flexible manufacturing system as an example and combining the observable state of each actuator in the part processing, the Petri net model is established to diagnose the unobservable part of the system and verify the effectiveness of the algorithm.

**Key words:** time Petri nets; partially observed; fault diagnosis; flexible manufacturing system

### 0 引言

柔性制造系统 (flexible manufacturing system, FMS) 通常由多个单元构成,各单元相互配合完成复杂加工任务。成熟的柔性制造系统动态行为更加复杂,可在 24 小时无人操作下智能生产,极大减少工人工作量,满足企业对市场需求的应变<sup>[1-3]</sup>。柔性制造系统在制造业的优势越来越明显,但实际生产过程中,也存在制造复杂,运行模式多样化等导致故障频繁,故

障样本难以获取,关键设备无法及时检测运行状况等问题<sup>[4-6]</sup>。因此,对柔性制造系统的故障诊断研究势在必行。

目前国内外很多科研机构都在开展关于柔性制造系统的故障诊断方法研究,并取得了一定成果。北京理工大学等机构在机器人可靠性分析研究时引入了故障树的研究方法,通过故障树定性定量的分析针对单一设备的故障诊断有了一定的理论实践研究<sup>[7]</sup>。Kuo

收稿日期:2017-08-16

修回日期:2017-12-26

网络出版时间:2018-05-16

基金项目:国家自然科学基金(61473144)

作者简介:张治国(1992-),男,硕士研究生,研究方向为软件测试、故障检测与诊断;刘久富,副教授,硕导,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。

网络出版地址: <http://cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20180515.1651.024.html>

等从 FMS 运行过程的行为角度出发,使用有色 Petri 网建模实现对 FMS 的状态监测及故障诊断<sup>[8-9]</sup>。

针对柔性制造系统,以往基于定性模型的故障方法已经取得了丰硕的成果,但主要集中在可观节点的故障诊断,对不可观节点的故障诊断还不够完善。对此,文中提出一种基于部分可观时间 Petri 网的故障诊断方法,把部分可观时间 Petri 网<sup>[10-12]</sup>和状态类图(state class graph, SCG)<sup>[13-14]</sup>相结合,构建修正状态类图(modified state class graph, MSCG),把复杂的并行事件转变成求解满足时间约束的序列集合。所有节点分为可观节点和不可观节点,根据各节点变迁触发时间范围和可观节点触发时间信息,结合提出的故障诊断方法,判断系统不可观节点是否发生故障。

## 1 部分可观时间 Petri 网的故障检测问题

### 1.1 部分可观时间 Petri 网

定义 1: Petri 网(Petri nets, PN)定义为  $N = (P, T, \text{Pre}, \text{Post})$ , 其中  $P$  为库所(place)集合,  $T$  为变迁(transition)集合,  $\text{Pre}: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  和  $\text{Post}: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  分别是输入弧和输出弧的集合, 每个库所的资源个数为  $M(p)$ 。

定义 2: 时间 Petri 网(time Petri nets, TPN)定义为  $N_d = (N, Q)$ ,  $N = (P, T, \text{Pre}, \text{Post})$  是 Petri 网的四元数组,  $Q: T \rightarrow \mathbb{Q} \times (\mathbb{Q} \cup \{\infty\})$  是系统初始状态下变迁时间约束条件,  $Q(t_i) = (l_i, u_i)$ ,  $l_i \geq 0, u_i \geq l_i$ ,  $l_i$  和  $u_i$  均为自然数。

变迁时间序列集合(transition time sequence, TTS)定义为  $\sigma = (t_0, \tau_0)(t_1, \tau_1) \cdots (t_h, \tau_h) \in (T \times \mathbb{R}_0^+)$ , 简记为  $M_0[\sigma > M_k]$ ,  $\sigma$  中最后触发时间为  $t_l(\sigma) = \tau_h$ 。

定义 3: 标签 Petri 网(label Petri net, LPN)定义为  $\langle N, M_0, L \rangle$ ,  $L: T \rightarrow L \cup \{\varepsilon\}$  为每个变迁分配一个标签  $L$  或空符号  $\varepsilon$ , 分别对应可观变迁和不可观变迁。

时间标签序列集合(time label sequence, TLS)  $\delta_0 = (\gamma_{e_0}, \tau_{e_0})(\gamma_{e_1}, \tau_{e_1}) \cdots (\gamma_{e_n}, \tau_{e_n}) \in (L \times \mathbb{R}_0^+)$  是可观变迁触发时间序列集合, 最后触发可观变迁时间定义为  $t_l(\delta_0) = \tau_{e_n}$ 。

### 1.2 故障检测问题

定义 4: 给定一个  $\delta_0 \in (L \times \mathbb{R}_0^+)^*$  和一个时间  $\tau \geq t_l(\delta_0)$ , 对应的时间序列集合为:

$$\sum (\delta_0, \tau) = \{ \sigma \in (T \times \mathbb{R}_0^+)^* \mid M_0[\sigma > M, L(\sigma) = \delta_0, t_l(\sigma) = \tau, \tau_h \leq \tau] \} \quad (1)$$

定义 5: 给定一个时间标签序列集合  $\delta_0 \in (L \times \mathbb{R}_0^+)^*$  和一个时间  $\tau \geq \tau_l(\delta_0)$ , 对应的标识集合为:

$$C(\delta_0, \tau) = \{ M \in \mathbb{N}^m \mid M_0[\sigma > M, \sigma \in \sum (\delta_0, \tau) \}$$

(2)

定义 6: 给定一个时间标签序列集合  $\delta_0 \in (L \times \mathbb{R}_0^+)^*$  和一个时间  $\tau \geq t_l(\delta_0)$ , 对应的状态集合为:

$$S(\delta_0, \tau) = \{ M_k, \Theta_k \mid M_k \in C(\delta_0, \tau), \Theta_k = \{ l_{ki} \leq \theta_{ki} \leq u_{ki} \}, l_{ki} \geq 0, u_{ki} \geq 0 \} \quad (3)$$

定义 7: 给定时间标签序列集合  $\delta_0 \in (L \times \mathbb{R}_0^+)^*$ 、截止时间  $\tau \in \mathbb{R}_0^+$  和故障类型  $T_f^i$  组成的集合  $(\delta_0, \tau, T_f^i)$ , 故障函数定义为:

$$\Gamma: (L \times \mathbb{R}_0^+)^* \times \mathbb{R}_0^+ \times \{ T_f^1, T_f^2, \dots, T_f^i \} \rightarrow \{ N, U, F \}$$

记  $\log(\sigma)$  为去掉时刻  $\tau$  的变迁序列集合。

(1)  $\forall \sigma \in \sum (\delta_0, \tau), \exists t_f \in T_f^i$ , 满足  $t_f \notin \log(\sigma)$ , 则  $\Gamma(\delta_0, \tau, T_f^i) = N$ 。

(2)  $\exists \sigma \in \sum (\delta_0, \tau), \exists t_f \in T_f^i$ , 满足  $t_f \in \log(\sigma)$ , 又  $\exists \sigma' \in \sum (\delta_0, \tau), \exists t_f \in T_f^i$  满足  $t_f \notin \log(\sigma)$ , 则  $\Gamma(\delta_0, \tau, T_f^i) = U$ 。

(3)  $\forall \sigma \in \sum (\delta_0, \tau), \exists t_f \in T_f^i$ , 满足  $t_f \in \log(\sigma)$ , 则  $\Gamma(\delta_0, \tau, T_f^i) = F$ 。

部分可观时间 Petri 网进行故障诊断要求设计一个状态估计方法, 寻找所有满足时间约束条件和时间标签序列集合  $\delta_0$  的 TTS 集合  $\sigma$ , 分析  $\sigma$  是否包含故障变迁  $t_f \in T_f^i$ , 判断 TPN 系统是否故障。

## 2 基于 MSCG 图和时间 Petri 网的故障诊断方法

### 2.1 修正状态类图构建方法

在状态类图方法<sup>[12-13]</sup>的基础上添加时间变量和时间约束, 构建基于标签时间 Petri 网的修正状态类图。

算法 1: 构建 MSCT。

输入: TPN 系统

输出: 修正状态类树(MSCT)

1. 初始化节点  $C_0$  对应标识  $M_0$ ,  $\Theta_0 = \{ l_i^0 \leq \theta_i \leq u_i^0 \}$ ,  $t_i \in A(M_0)$ , 根节点标记  $B(C) = E$
- while 存在一个标记  $B(C) = E$  的节点 do
2. 节点标识为  $C_k$ ,  $B(C) = D$
3. for  $\forall t_i \in A(M_k)$  do
4. if  $\max\{0, l_i^k\} \leq \min_j\{t_j \in A(M_k) \mid u_j^k\}$  then
5.  $t_i$  在标识  $M_k$  触发,  $M_q = M_k + C(\cdot, t_i)$
6. for  $\forall t_r \in A(M_q)$  do
- if  $t_r \in A(M_k)$  且  $M_k - \text{Pre}(\cdot, t_i) \geq \text{pre}(\cdot, t_r)$  pre $(\cdot, t_r)$  then
- $l_r^q = l_r^k - \Delta_i, u_r^q = u_r^k - \Delta_i$
- else  $l_r^q = l_r, u_r^q = u_r\}$
7. 建立新节点  $C_q$  标识为  $M_q$ , 约束集合为:

$$\Theta_q = \{ \max\{0, l_r^q\} \leq \theta_q \leq u_r^q \}, \forall t_r \in A(M_q)$$

if 存在和  $C_q$  相同节点 then

$$C_q \text{ 节点标记 } B(C) = D$$

Else  $C_q$  节点标记  $B(C) = E \}$

构建 MSCG 图首先根据算法 1 构建 MSCT。步骤 1 给定初始条件及输入输出;步骤 2 使用  $B:C \rightarrow \{E, D\}$  区分新节点与已有节点,避免重复构建相同节点,其中  $D$  为已有节点;步骤 4 满足  $\max\{0, l_i^k\} \leq \min_j: t_j \in A(M_k) \{u_j^k\}$  的使能变迁才能触发进而保证其他变迁的触发;步骤 6 定义  $\Delta_i$  为当前变迁触发时刻与上一变迁触发时刻间隔,若变迁  $tr$  在上一个节点已经使能,则修改约束  $l_r^q = l_r^k - \Delta_i$ ,  $u_r^q = u_r^k - \Delta_i$ , 否则  $l_r^q = l_r^k$ ,  $u_r^q = u_r^k$ 。

在 MSCT 中复制标记为  $B(C) = Z$  的节点,构建 MSCG 图。

## 2.2 基于 MSCG 图和时间 Petri 网的状态估计

给定一个时间标签序列集合  $\delta_0 = (\gamma_{i1}, \tau_1)(\gamma_{i2}, \tau_2) \cdots (\gamma_{ih}, \tau_h) \in (L \times \mathbb{R}_0^+)$  和截止时间  $\tau \geq 0$  对应的 MSCG 路径:

$$\begin{aligned} \pi &= C_{q0}(M_{q0}, \Theta_{q0}), t_{i1}, L(t_{i1}) \\ \Delta^{(1)} &\in [\max\{0, l_{i1}^{q0}\}, \min_{j: t_j \in A(M_{q0})} \{u_j^{q0}\}] \\ C_{q1}(M_{q1}, \Theta_{q1}), t_{i2}, L(t_{i2}) \\ \Delta^{(2)} &\in [\max\{0, l_{i2}^{q1}\}, \min_{j: t_j \in A(M_{q1})} \{u_j^{q1}\}] \\ &\dots \\ C_{q(k-1)}(M_{q(k-1)}, \Theta_{q(k-1)}), t_{ik}, L(t_{ik}) \\ \Delta^{(k)} &\in [\max\{0, l_{ik}^{q(k-1)}\}, \min_{j: t_j \in A(M_{q(k-1)})} \{u_j^{q(k-1)}\}] \\ C_{qk} \end{aligned} \quad (4)$$

定理 1: 给定路径 4 起始于根节点  $C_{q0}$  结束于  $C_{qk}$ , 符合时间标签序列集  $\delta_0 = (\gamma_{i1}, \tau_1)(\gamma_{i2}, \tau_2) \cdots (\gamma_{ih}, \tau_h) \in (L \times \mathbb{R}_0^+)$ , 满足约束:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{l=1}^k \Delta^{(l)} &\leq \tau \\ \tau - \sum_{l=1}^k \Delta^{(l)} &< \min_{r: t_r \in \text{out}(C_{qk})} \{u_r^{qk}\} \\ \Delta^{(l)} &\geq \max\{0, l_{il}^{q(l-1)}\}, l = 1, 2, \dots, k \\ \Delta^{(l)} &\leq \min_{j: t_j \in A(M_{q(l-1)})} \{u_j^{q(l-1)}\}, l = 1, 2, \dots, k \\ \sum_{l=1}^q \Delta^{(l)} &= \tau_h, \forall t_{iq} \in \log(\delta_0) \\ \text{out}(C_q) &\text{ 为状态集合的下边界} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

给定路径  $\pi$ , 定义  $\text{obs}(\pi)$  为其对应的可观序列, 式(5)中  $\text{obs}(\pi) = L(t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ik})$ 。

算法分析: 算法 2 寻找所有满足时间约束及时间标签序列集合  $\delta_0$  的路径  $\pi$  对应集合  $\Pi$ , 根据故障诊断函数  $\Gamma(\delta_0, \tau, T_f^u)$  判断系统故障状态; 步骤 2 ~ 4 寻找只在根节点触发和 0 时刻完成所有路径触发且满足

约束 (5) 的变迁触发路径  $\pi$ ; 后面算法寻找  $\tau > 0$  且满足约束 (5) 的变迁触发路径  $\pi$ , 包括在第一个可观节点  $(\gamma, \bar{\tau})$  触发前完成所有变迁触发的路径,  $(\gamma, \bar{\tau})$  为最后一个触发的变迁路径以及  $\tau > \bar{\tau}$  还有变迁触发的路径。所有满足约束 (5) 且存在可观变迁的路径  $\pi$  放在集合  $\Pi$  中。

步骤 16 判断系统是否发生故障。任意  $\pi \in \Pi$ , 都不存在  $t_f \in \pi$ , 系统没有故障; 存在  $\pi \in \Pi$ , 满足  $t_f \in \pi$  同时存在  $\pi' \in \Pi$  满足  $t_f \notin \pi'$ , 无法判断系统是否故障; 所有  $\pi \in \Pi$  都满足  $t_f \in \pi$ , 系统故障。

算法 2: 基于 MSCG 的状态估计与诊断算法。

输入: TPN 系统及对应 MSCG 图, TLS 集合  $\delta_0 = (\gamma_{i1}, \tau_1) \cdots (\gamma_{ih}, \tau_h)$ , 时间  $\tau$

输出: 故障诊断结果  $\Gamma(\delta_0, \tau, \sigma_f')$

1. 初始化:  $\delta_0 = \varepsilon, S(\delta_0, 0) = \emptyset$

2. 所有满足  $\text{obs}(\pi) = \varepsilon$  的路径放在集合  $\Pi$

3. 所有  $\pi \in \Pi$  且  $\tau = 0$ , 满足式 5 的路径放在集合  $\Pi$

4. for 所有  $\pi \in \Pi$  路径 do

$S(\varepsilon, 0) = S(\varepsilon, 0) \cup \{(M, \Theta)\}$ ,  $(M, \Theta)$  是路径  $\pi$  最后节点

5. if 给定  $S(\varepsilon, \tau)$ ,  $\tau > 0$  then

6. 令  $S(\varepsilon, \tau) = \emptyset$ , 所有  $\pi \in \Pi$ ,  $\tau > 0$  且满足式 5 的路径放在集合  $\Pi_\tau$

7. for 所有  $\pi \in \Pi_\tau$  do

$S(\varepsilon, \tau) = S(\varepsilon, \tau) \cup \{(M, \Theta')\}$ ,  $\Theta'$  是根据式 5 得出的最后节点时间约束

8. 给定可观变迁  $(e, \bar{\tau})$ 。

9. 令  $\delta_0' = \delta_0, \delta_0 = \delta_0'(e, \bar{\tau}), \Pi' = \Pi, S(\delta_0', \bar{\tau}) = \emptyset$

10. 所有  $\pi \in \Pi'$  且经过扩展后满足  $\text{obs}(\pi) = \log(\delta_0')$  的路径放在集合  $\Pi$

11. 所有  $\pi \in \Pi$ ,  $\tau = \bar{\tau}$  时可观测变迁触发且满足约束 5 的路径  $\pi$  放在集合  $\Pi$

12. for  $\pi \in \Pi$  do

$$S(\delta_0, \tau) = S(\delta_0, \tau) \cup \{(M, \Theta)\}$$

13. if 给定  $S(\varepsilon, \tau)$ ,  $\tau > \bar{\tau}$  then

14. 令  $S(\delta_0, \tau) = \emptyset$ , 所有  $\pi \in \Pi$ ,  $\tau > \bar{\tau}$  且满足式 5 的路径放在集合  $\Pi$

15. for 所有  $\pi \in \Pi_\tau$  do

$$S(\delta_0, \tau) = S(\delta_0, \tau) \cup \{(M, \Theta')\}$$

16. for  $i = 1, 2, \dots, r$  do

if  $\forall \pi \in \Pi \wedge \forall t_i \in T_i^*, t_i \notin \pi$  then

$$\Gamma(\delta_0, \tau, T_i^*) = N$$

else if  $\exists \pi \in \Pi, \pi' \in \Pi$ , (1)  $\exists t_i \in T_i^*, t_i \in \pi$  (2)  $\forall t_i \in T_i^*, t_i \notin \pi'$  then

$$\Gamma(\delta_0, \tau, T_i^*) = U$$

else if  $\forall \pi \in \Pi, \forall t_i \in T_i^*, t_i \in \pi$

$$\Gamma(\delta_0, \tau, T_i^s) = F$$

3 实例分析与验证

某柔性制造系统(FMS)由一台加工中心 M 和多台数控机床组成,并行生产一组零件。工序设计要求工件 b 根据工件 a 在 M 的校刀数据进行加工。

3.1 构建柔性制造系统模型

图 1 以柔性制造系统加工过程中关键节点为库所,关键动作作为变迁建立 Petri 网模型,模拟柔性制造系统加工过程,各库所、变迁含义如表 1、表 2 所示。

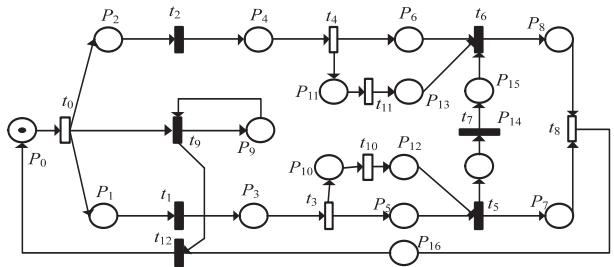


图 1 柔性制造系统 Petri 网模型

表 1 图 1 中各库所物理含义

库所	库所含义	库所	库所含义
$P_0$	系统准备就绪	$P_9$	冷却系统准备
$P_1$	A 加工中心准备	$P_{10}$	$A_2$ 工序准备
$P_2$	B 加工中心准备	$P_{11}$	$B_2$ 工序准备
$P_3$	工件 a 进入传送带	$P_{12}$	$A_2$ 工序完成
$P_4$	工件 b 进入传送带	$P_{13}$	$B_2$ 工序完成
$P_5$	缓冲区使能	$P_{14}$	工件 a 准备加工
$P_6$	缓冲区使能	$P_{15}$	工件 b 准备加工
$P_7$	A 线完成	$P_{16}$	系统准备停机
$P_8$	零件加工完成		

表 2 图 1 中各变迁物理含义、可观测性及设计动作时间

变迁	变迁含义	可观测性	触发时间/min
$t_0$	系统启动	可观	0
$t_1$	A 加工中心工序完成	不可观	2.5~6.7
$t_2$	B 加工中心工序完成	不可观	4.0~7.9
$t_3$	工件 a 通过传送带	可观	2.2~6.5
$t_4$	工件 b 通过传送带	可观	3.8~8.1
$t_5$	工件 a 放到缓冲区	不可观	3.1~5.2
$t_6$	工件 b 加工	不可观	4.4~8.5
$t_7$	工件 a 加工	不可观	0.5~2.2
$t_8$	一组零件加工完成	可观	2.1~5.8
$t_9$	冷却系统工作	不可观	1.1~2.3
$t_{10}$	$A_2$ 工序完成	可观	0.8~2.3
$t_{11}$	$B_2$ 工序完成	可观	0.8~2.3
$t_{12}$	工件 a 回到初始位	不可观	5~20

该柔性制造系统工作流程为<sup>[15-16]</sup>:毛坯 a,b 分别进入 A,B 支路,经过数控机床相应工序变成工件 a,b;工件 a 先进入加工中心 M 校准刀具加工,工件 b 再进入加工中心 M 根据工件 a 的校刀数据加工。最后完成一组零件的加工。

3.2 柔性制造系统故障诊断

3.2.1 构建柔性制造系统的 MSCG 图

根据算法 1 构建 MSCG 图,标识  $M$  及时间约束  $\Theta$  构成每个节点的基本信息,所有可能路径为  $\{t_0t_1t_2t_3t_4t_{10}t_{11}t_5t_7t_6t_8, t_0t_1t_2t_3t_4t_{11}t_{10}t_5t_7t_6t_8, t_0t_1t_2t_3t_{10}t_4t_{11}t_5t_7t_6t_8, t_0t_1t_2t_4t_3t_{10}t_{11}t_5t_7t_6t_8, t_0t_1t_2t_4t_3t_{11}t_{10}t_5t_7t_6t_8, t_0t_1t_2t_4t_{11}t_3t_{10}t_5t_7t_6t_8\}$  等。

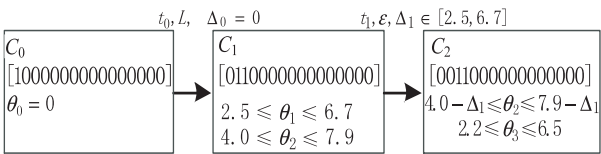


图 2 节点  $C_1C_2C_3$  对应的 MSCG 图

以  $\{t_0t_1t_2t_3t_4t_{10}t_{11}t_5t_7t_6t_8\}$  为例简述修正状态类图构建过程,图 2 是变迁  $t_0t_1$  触发对应节点  $C_1C_2C_3$  的 MSCG 图。标识  $M_0$  和时间约束  $\Theta_0$  构成初始节点  $C_0$  对应的使能变迁为  $t_0$ ;节点  $C_1$  由变迁  $t_0$  在  $C_0$  触发得到,标识  $M_1[011000000010000000]$  对应的使能变迁为  $t_1, t_2$ ,且  $Q(t_1) = [2.5, 6.7], Q(t_2) = [4.0, 7.9]$ ;节点  $C_2$  由变迁  $t_1$  在  $C_1$  触发得到,标识  $M_2[001100000010000000]$  对应的使能变迁为  $t_2, t_3$ ,变迁  $t_2$  能触发需满足  $\Delta_1 \leq \min\{u_1, u_2\}$ ,所以修正后的  $Q(t_2) = [4.0 - \Delta_1, 7.9 - \Delta_1]$ ;节点  $C_3$  由变迁  $t_2$  在  $C_2$  触发得到,标识  $M_3[000110000010000000]$ ,对应的使能变迁为  $t_3, t_4$ ,变迁  $t_3$  能触发需满足  $\Delta_2 \leq \min\{u_2, u_3\}$ ,所以修正后的  $Q(t_3) = [2.2 - \Delta_2, 6.5 - \Delta_2]$ ,同理构建其他节点。

3.2.2 基于 MSCG 图柔性制造系统的故障诊断结果

柔性制造系统中工业机器人腰部回转故障影响系统正常工作。文中 Petri 网模型中,工业机器人腰部回转无故障情况下,工件 a 放到缓冲区(变迁  $t_5$ )会在  $A_2$  工序在 3.1~5.2 min 内完成,若工业机器人腰部回转故障便会导致变迁  $t_5$  完成的时间推迟到 5.2~12.3 min 内。图 3 是根据仿真数据及文中算法进行故障诊断的结果,其中  $\tau$  是采集有效数据的时间上限。

由图 3 可知,在第一次实验中,可观序列  $(t_0, 0)(t_3, 7.6)(t_{10}, 8.6)(t_4, 11.7)(t_{11}, 13.1)$  触发后,由算法 2 计算所有能够触发的变迁序列  $\sigma$ ,其中正常变迁 4 条,故障变迁 0 条,系统诊断结果为无故障。可观序列  $(t_8, 24.9)$  触发后,由算法 2 计算所有能够触发的变迁序列  $\sigma$ ,其中正常变迁 4 条,故障变迁 2 条,系统诊断结果为可能故障。



$\delta_0/\text{min}$	$\tau/\text{min}$	$T_f^i$	$\log(\sigma)$	$\Gamma(\delta_0, \tau, T_f^i)$
第一次实验				
$(t_0, 0)(t_3, 7.6)$	15.5	$t_5$	$\{t_0t_1t_2t_3, t_0t_2t_1t_3\}$	N
$(t_0, 0)(t_3, 7.6)(t_{10}, 8.6)$	16.0	$t_5$	$\{t_0t_1t_2t_3t_{10}, t_0t_2t_1t_3t_{10}\}$	N
$(t_0, 0)(t_3, 7.6)(t_{10}, 8.6)(t_4, 11.7)$	18.3	$t_5$	$\{t_0t_1t_2t_3t_{10}t_4, t_0t_2t_1t_3t_{10}t_4\}$	N
$(t_0, 0)(t_3, 7.6)(t_{10}, 8.6)(t_4, 11.7)(t_{11}, 13.1)$	44.3	$t_5$	$\{t_0t_1t_2t_3t_{10}t_4t_{11},$ $t_0t_2t_1t_3t_{10}t_4t_{11},$ $t_0t_1t_2t_3t_{10}t_4t_5t_{11},$ $t_0t_2t_1t_3t_{10}t_4t_5t_{11}\}$	N
$(t_0, 0)(t_3, 7.6)(t_{10}, 8.6)(t_4, 11.7)(t_{11}, 13.1)(t_8, 24.9)$	64.3	$t_5$	$\{t_0t_1t_2t_3t_{10}t_4t_{11}t_5t_7t_6t_8,$ $t_0t_2t_1t_3t_{10}t_4t_{11}t_5t_7t_6t_8,$ $t_0t_1t_2t_3t_{10}t_4t_5t_{11}t_7t_6t_8,$ $t_0t_2t_1t_3t_{10}t_4t_5t_{11}t_7t_6t_8,$ $t_0t_1t_2t_3t_{10}t_4t_{11}t_7t_6t_8,$ $t_0t_2t_1t_3t_{10}t_4t_{11}t_7t_6t_8\}$	U
第二次实验				
$(t_0, 0)(t_3, 7.3)$	15.5	$t_5$	$\{t_0t_1t_2t_3, t_0t_2t_1t_3\}$	N
$(t_0, 0)(t_3, 7.3)(t_4, 8.3)$	15.5	$t_5$	$\{t_0t_1t_2t_3t_4, t_0t_2t_1t_3t_4\}$	N
$(t_0, 0)(t_3, 7.3)(t_4, 8.3)(t_{10}, 8.5)$	18.3	$t_5$	$\{t_0t_1t_2t_3t_4t_{10}, t_0t_2t_1t_3t_4t_{10}\}$	N
$(t_0, 0)(t_3, 7.3)(t_4, 8.3)(t_{10}, 8.5)(t_{11}, 9.8)$	44.3	$t_5$	$\{t_0t_1t_2t_3t_4t_{10}t_{11}, t_0t_2t_1t_3t_4t_{10}t_{11}\}$	N
$(t_0, 0)(t_3, 7.3)(t_4, 8.3)(t_{10}, 8.5)(t_{11}, 9.8)(t_8, 31.2)$	64.3	$t_5$	$\{t_0t_1t_2t_3t_4t_{10}t_{11}t_7t_6t_8, t_0t_2t_1t_3t_4t_{10}t_{11}t_7t_6t_8\}$	F

图 3 柔性制造系统故障诊断结果

第二次实验中,可观序列  $(t_0, 0)(t_3, 7.3)(t_4, 8.3)(t_{10}, 8.5)(t_{11}, 9.8)$  触发后,由算法 2 计算所有能够触发的变迁序列  $\sigma$ ,其中正常变迁 2 条,故障变迁 0 条,系统诊断结果为无故障。可观序列  $(t_8, 31.2)$  触发后,由算法 2 计算所有能够触发的变迁序列  $\sigma$ ,其中正常变迁 0 条,故障变迁 2 条,系统诊断结果为故障。

4 结束语

针对 Petri 网模型中不可观节点故障诊断问题,提出一种构建修正状态类图的故障诊断方法,由算法 2 计算 MSCG 图中所有满足可观序列集合  $S(\delta_0, \tau)$  的序列  $\sigma$  并诊断系统是否发生故障;建立柔性制造系统的部分可观时间 Petri 网故障诊断模型,根据变迁之间触发关系修正各自对应的时间约束,由算法 1 构建对应的修正状态类图(MSCG),再根据算法 2 诊断系统的故障状态。仿真结果表明,该算法能够满足实际应用要求。

构和变迁数目影响构建 MSCG 图的计算复杂度,当系统变迁数目过多时,该算法还需进一步改进。

参考文献:

[1] 潘理,郑红,郭观七,等.基于蚁群优化的时间 Petri 网及其在柔性制造系统调度优化中的应用[J].电子学报,2014,42(8):1531-1537.

[2] 姜思杰,李志华.基于 Petri 网的柔性制造系统动态优化模型[J].计算机集成制造系统,2005,11(4):462-466.

[3] 胡核算,李志武,王安荣.基于信标的柔性制造系统的优化死锁预防策略[J].控制与决策,2006,21(12):1343-1348.

[4] HWANG I, KIM S, KIM Y, et al. A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2010, 18(3): 636-653.

[5] 刘久富,周建勇,刘文良,等.广义互斥约束的 Petri 网死锁避免监控器设计[J].农业机械学报,2015,46(8):327-332.

[6] YANG Hao, JIANG Bin, COCQUEMPOT V, et al. Spacecraft

未来将研究标签时间 Petri 网的可诊断性,系统结

将多个属性之间的特征联合训练,有效提升了属性分类的准确率。采集了两种不同的数据集对基于 Faster R-CNN 的车辆多属性识别方法进行了测试,实验结果表明,该方法在不同道路场景下均具有较高的检测精度,满足了使用要求,而且可以识别出车辆的品种、姿态、颜色等信息,具有较高的分类准确率和良好的适用性和鲁棒性。同时,该方法需要完善的方面还有很多,如车辆的其他重要属性(车辆类型、车内人数等)更加细粒度的属性分类问题的研究和建立更加全面丰富的车辆数据集以提升车辆检测精度等。

#### 参考文献:

- [1] 康维新,曹宇亭,盛 卓,等.车辆的 Harris 与 SIFT 特征及车型识别[J].哈尔滨理工大学学报,2012,17(3):69-73.
- [2] 曹晓明.基于多图像特征金字塔的车辆检测[D].北京:北京交通大学,2016.
- [3] FELZENSZWALB P,MCALLESTER D,RAMANAN D. A discriminatively trained, multiscale, deformable part model[C]//IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Anchorage, AK, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [4] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. [s. l.]: IEEE, 2014: 580-587.
- [5] GIRSHICK R. Fast r-cnn[C]//Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. Santiago, Chile: IEEE, 2015: 1440-1448.
- [6] REN Shaoqing, HE Kaiming, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2015, 39(6): 1137-1149.
- [7] LI Xiuzhi, ZHANG Guanming, FANG Jing, et al. Vehicle color recognition using vector matching of template[C]//Third international symposium on electronic commerce and security. Guangzhou, China: IEEE, 2010: 189-193.
- [8] 张 军, 张 婷, 杨正瓴, 等. 深度卷积神经网络的汽车车型识别方法[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(11): 19-22.
- [9] 唐朝霞, 俞扬信, 张 粤. 基于粒子群算法和云模型的车型识别[J]. 微电子学与计算机, 2013, 30(11): 80-83.
- [10] 赵志宏, 杨绍普, 马增强. 基于卷积神经网络 LeNet-5 的车牌字符识别研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(3): 638-641.
- [11] SZEGEDY C, LIU Wei, JIA Yangqing, et al. Going deeper with convolutions[C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Boston, MA, USA: IEEE, 2015: 1-9.
- [12] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks[C]//Proceedings of the 25th international conference on neural information processing systems. Lake Tahoe, Nevada: Curran Associates Inc., 2012: 1097-1105.
- [13] YANG Linjie, LUO Ping, LOY C C, et al. A large-scale car dataset for fine-grained categorization and verification[C]//IEEE conference on computer vision and pattern recognition. Boston, MA, USA: IEEE, 2015: 3973-3981.
- [14] RUSSAKOVSKY O, DENG J, SU H, et al. ImageNet large scale visual recognition challenge[J]. International Journal of Computer Vision, 2014, 115(3): 211-252.
- [15] JIA Yangqing, SHELHAMER E, DONAHUE J, et al. Caffe: convolutional architecture for fast feature embedding[C]//Proceedings of the 22nd ACM international conference on multimedia. Orlando, Florida, USA: ACM, 2014: 675-678.
- [11] LEFEBVRE D. On-line fault diagnosis with partially observed petri nets[J]. Transaction on Automatic Control, 2014, 59(7): 1919-1924.
- [12] 叶丹丹, 罗继亮. 部分可观 Petri 网结构信息在故障诊断中的应用[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(3): 366-373.
- [13] CABASINO M P, LAFORTUNE S, SEATZU C. Optimal sensor selection for ensuring diagnosability in labeled petri nets[J]. Automatica, 2013, 49(8): 2373-2383.
- [14] LIME D, ROUX O H. Model checking of time petri nets using the state class timed automaton[J]. Discrete Event Dynamic Systems, 2006, 16(2): 179-205.
- [15] 陈 哲, 刘久富, 王正谦. 基于正态 Petri 网的模型参数识别研究[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(5): 20-22.
- [16] CHEN Yufeng, LI Zhiwu, KHALGUI M, et al. Design of a maximally permissive liveness-enforcing Petri net supervisor for flexible manufacturing systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2011, 8(2): 374-393.

(上接第 87 页)

- formation stabilization and fault tolerance: a state-varying switched system approach[J]. Systems and Control Letters, 2013, 62(9): 715-722.
- [7] 李 慧, 崔成玲, 李新宏. 柔性制造系统中 CNC 机床故障诊断机理研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(8): 2982-2984.
- [8] CABASINO M P, GIUA A. Diagnosability of discrete event systems using labeled Petri nets[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(1): 144-153.
- [9] 罗继亮. Petri 网的一类禁止状态问题的混合型监控器算法设计[J]. 计算机学报, 2008, 31(2): 291-298.
- [10] SIMONA B, JAVIER C, JOSE M. Timing-failure risk assessment of UML design using time Petri net bound techniques[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(1): 90-104.