

# 组件多工作模式下的离散事件系统监督控制方法研究

焦 亭<sup>†</sup>, 刘振国

(山西大学 自动化系, 山西 太原 030006)

**摘要:** 针对组件多工作模式下的离散事件系统, 提出一种监督控制方法. 利用Ramadge-Wonham监督控制架构, 计算出组件各工作模式下对应的监督控制器. 然后, 利用所提的merge算法将组件各工作模式下对应的监督控制器合并, 以生成融合监督控制器. 再利用所提的事件选择函数得到在融合监督控制器各状态允许发生的事件, 从而保证系统在融合监督控制器作用下的可控且非阻塞运行. 最后, 通过一个带反馈功能的制造系统演示本文所提方法的有效性, 该系统中的检测单元将根据工件未通过检测的次数选择工作模式. 相比于运用扩展有限状态机进行变量抽象的方法, 本文所提方法更加直观简便, 并能适应多个工件同时处于系统中时的情形.

**关键词:** 离散事件系统; 监督控制理论; 多工作模式组件; 融合监督控制器

**引用格式:** 焦亭, 刘振国. 组件多工作模式下的离散事件系统监督控制方法研究. 控制理论与应用, 2020, 37(3): 534 – 539

DOI: 10.7641/CTA.2019.80621

## Study on the supervisory control of discrete-event systems incorporating components with several working modes

JIAO Ting<sup>†</sup>, LIU Zhen-guo

(Department of Automation, Shanxi University, Taiyuan Shanxi 030006, China)

**Abstract:** A supervisory control approach is presented for discrete-event systems incorporating components with several working modes. By utilizing the Ramadge-Wonham supervisory control framework, the corresponding supervisors in each working mode are computed. In order to generate the merged supervisor, the corresponding supervisors in each working mode are combined together by using the proposed algorithm “merge”. The event selection function is defined to obtain the events enabled at each state of the merged supervisor, thereby ensuring the controllable and nonblocking operation of the system under its supervision. Finally, the validity of the proposed approach is illustrated by a manufacturing system with material feedback, in which the working mode of the test unit is selected by the times of workpieces failing to pass the test. Compared with the variable abstraction approach by exploiting extended finite-state machines, the approach in this paper is more intuitive and convenient. Moreover, our approach is adapted to the case that several workpieces coexist in the system.

**Key words:** discrete-event systems; supervisory control theory; components with several working modes; merged supervisor

**Citation:** JIAO Ting, LIU Zhenguo. Study on the supervisory control of discrete-event systems incorporating components with several working modes. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(3): 534 – 539

## 1 引言

现有监督控制理论主要针对组成离散事件系统的各组件工作于单一工作模式的情形, 通过计算所得的监督控制器使系统运行满足给定的性能指标<sup>[1–6]</sup>. 近年来已有学者开始研究组件根据工件的加工情况选择不同工作模式的离散事件系统监督控制方法. 例如, Teixeira等借鉴文献[7]中的抽象方法提出一种扩展有

限状态自动机(extended finite-state machines)的变量抽象(variable abstraction)方法, 使被控的制造系统能根据工件被加工的次数选择检测单元的工作模式<sup>[8–9]</sup>. Cury等提出区分器(distinguishers)的概念以识别工件已被加工次数的信息, 从而基于该信息选择正确的检测单元工作模式<sup>[10–13]</sup>. Rosa等提出一种基于区分器的近似监督控制方法<sup>[14]</sup>, 该方法虽然能进一步简化监

收稿日期: 2018–08–20; 录用日期: 2019–04–02.

<sup>†</sup>通信作者. E-mail: tjiao@sxu.edu.cn; Tel.: +86 13633442412.

本文责任编辑: 赵千川.

国家青年科学基金项目(61603231), 山西省青年科技研究基金(面上青年基金)项目(201801D221167)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61603231) and the Youth Science and Technology Research Fund of the Shanxi Science and Technology Department of China (201801D221167).

督控制器的计算过程, 得到最少限制的监督控制器, 但是该计算过程仍然很复杂. Teixeira等将基于区分器的局部模块化控制应用于一个制造系统<sup>[15]</sup>.

然而, 以上方法均引入了额外的事件以选择正确的组件工作模式. 引入额外的事件意味着被控对象的复杂度随之增大, 进而增大了监督控制器的复杂度. 此外, 随着组件工作模式的增加, 额外引入的事件数量也将随之显著增长. 文献[8-9, 14]虽然通过变量抽象等方式对监督控制器进行了一定的简化, 但这些方法实现过程复杂.

为此, 本文提出一种融合监督控制器的生成方法, 该方法无需引入额外的事件, 因此不会导致融合监督控制器状态数急剧增长; 且可证明所设计的融合监督控制器能保证系统的可控且非阻塞运行. 本文所提方法的另一个优势是能适应多个工件同时处于系统中的情形, 而上述文献中并未涉及该问题.

本文所提方法与离散事件系统控制律重构方法的不同之处在于: 控制律重构主要解决由于系统结构或性能指标发生改变引起监督控制器发生改变后, 监督控制器之间的状态切换问题<sup>[16-17]</sup>; 而本文基于组件各工作模式下的监督控制器生成融合监督控制器, 通过定义事件选择函数保证系统的正确运行. 由此可见, 本文所提方法可避免监督控制器之间的状态切换问题.

为了描述更加直观、清晰, 表1列出了后文将用到的主要数学符号.

表1 主要数学符号表  
Table 1 Nomenclature

| 数学符号                                   | 含义                                               |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------|
| $G$                                    | 自动机                                              |
| $\delta(q, s)$                         | 描述从状态 $q$ 出发事件串 $s$ 发生的转移函数                      |
| $L(G)$                                 | 自动机 $G$ 所生成语言的闭性质                                |
| $L_m(G)$                               | 自动机 $G$ 所生成语言的标识性质                               |
| $\bar{K}$                              | 语言 $K$ 的前缀闭包                                     |
| $\Sigma_u$                             | 不可控事件集合                                          |
| $\Sigma_c$                             | 可控事件集合                                           |
| $E$                                    | 性能指标                                             |
| $\mathcal{C}(E)$                       | 关于 $G$ 可控且满足 $E$ 的可控子语言集合                        |
| $\sup \mathcal{C}(E)$                  | $\mathcal{C}(E)$ 中的最大元素                          |
| $A_{\text{sup}} \wedge B_{\text{sup}}$ | 监督控制器 $A_{\text{sup}}$ 与 $B_{\text{sup}}$ 的交集    |
| $Q_{\text{mA}} \times Q_{\text{mB}}$   | 标识状态集合 $Q_{\text{mA}}$ 与 $Q_{\text{mB}}$ 的笛卡尔集   |
| $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$  | 由 $A_{\text{sup}}$ 与 $B_{\text{sup}}$ 生成的融合监督控制器 |
| $D(q)$                                 | 在状态 $q$ 被禁止的事件组成的集合                              |
| $W_{\text{Inf}}^\circ$                 | 工件信息集合                                           |

## 2 预备知识

### 2.1 离散事件系统

离散事件系统利用由5元组(5-tuple)描述的自动

机(automaton)建模, 如自动机

$$G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m),$$

其中:  $Q$ 为状态集合;  $\Sigma$ 为事件集合;  $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$ 为转移函数; 该函数一般为偏函数(partial function);  $q_0$ 为初始状态;  $Q_m$ 为标识状态集合. 利用字符串长度的递推, 转移函数可扩展为 $\delta: Q \times \Sigma^* \rightarrow Q$ , 其中 $\Sigma^*$ 表示事件集合 $\Sigma$ 上的Kleene闭包<sup>[1]</sup>.

自动机 $G$ 所生成语言(language)的闭性质(closed behavior)可表示为

$$L(G) := \{s \in \Sigma^* | \delta(q_0, s)!\},$$

其中符号 $\delta(q_0, s)!$ 表示 $\delta(q_0, s)$ 有定义, 即从初始状态 $q_0$ 出发事件串 $s$ 可发生<sup>[1]</sup>.

自动机 $G$ 所生成语言的标识性质(marked behavior)可表示为

$$L_m(G) := \{s \in L(G) | \delta(q_0, s) \in Q_m\}.$$

任意两事件串 $s_1, s_2 \in \Sigma^*$ 均是可连接的(concatenated), 记作 $s_1.s_2$ <sup>[1]</sup>.

### 2.2 监督控制理论

对任意语言 $K \subseteq \Sigma^*$ ,  $K$ 关于 $L(G)$ 可控需满足

$$(\forall s, \sigma) s \in \bar{K}, \sigma \in \Sigma_u, s\sigma \in L(G) \Rightarrow s\sigma \in \bar{K},$$

其中:  $\bar{K}$ 表示语言 $K$ 的前缀闭包(prefix-closure);  $\Sigma_u$ 表示不可控事件集合<sup>[1]</sup>. 在监督控制理论中, 事件集合 $\Sigma$ 被划分为可控事件集合与不可控事件集合, 分别用符号 $\Sigma_c$ 与 $\Sigma_u$ 表示.

令 $E \subseteq \Sigma^*$ 表示性能指标, 关于 $G$ 可控且满足性能指标 $E$ 的所有可控子语言可记作

$$\mathcal{C}(E) = \{K \subseteq E | K \text{ 关于 } G \text{ 可控}\}.$$

集合 $\mathcal{C}(E)$ 中的最大元素记作

$$\sup \mathcal{C}(E) := \cup \{K | K \in \mathcal{C}(E)\}.$$

所得结果即为满足性能指标 $E$ 的监督控制器. 可使用TCT软件包中的supcon指令进行计算<sup>[1, 18]</sup>.

如果在监督控制器的作用下, 从系统的初始状态出发经由事件的发生总能回到标识状态, 则称系统非阻塞(nonblocking).

## 3 组件多工作模式下的离散事件系统监督控制方法

在现有的离散事件系统中, 组成系统的组件往往只有一种既定的工作模式. 但在控制要求更为复杂的系统中, 有时需要根据工件的加工状况决定下一步的加工流程. 例如对于自动生产线中的检测单元, 如果同一个工件连续两次均未通过检测单元的检测, 则检测单元不再将该工件送回系统中进行再次加工, 而是作为次品直接输出系统.

为了描述的简便并不失一般性,假设系统中只有一个组件存在两种工作模式.两种工作模式下由同步积(synchronous product)<sup>[1,18]</sup>计算所得的系统总的被控对象与性能指标分别记作 $G_A, E_A$ 与 $G_B, E_B$ ,对应的监督控制器分别为

$$A_{\text{sup}} = \text{supcon}(G_A, E_A),$$

$$B_{\text{sup}} = \text{supcon}(G_B, E_B).$$

需要根据监督控制器 $A_{\text{sup}}$ 与 $B_{\text{sup}}$ 的信息与进入系统的工件加工情况,做出相应的控制决策.为此,首先定义监督控制器的融合算法.

假设

$$A_{\text{sup}} := (Q_A, \Sigma_A, \delta_A, q_{0A}, Q_{mA}),$$

$$B_{\text{sup}} := (Q_B, \Sigma_B, \delta_B, q_{0B}, Q_{mB}).$$

将 $A_{\text{sup}}$ 与 $B_{\text{sup}}$ 的交集记作

$$A_{\text{sup}} \wedge B_{\text{sup}} = (Q_{A \cap B}, \Sigma_{A \cap B}, \delta_{A \cap B}, (q_{0A}, q_{0B}), Q_{mA} \times Q_{mB}),$$

其中:

$$Q_{A \cap B} := \{(q_a, q_b) | q_a = \delta_A(q_{0A}, s), \\ q_b = \delta_B(q_{0B}, s), s \in (\Sigma_A \cap \Sigma_B)^*\};$$

$Q_{mA} \times Q_{mB}$ 为集合 $Q_{mA}$ 与 $Q_{mB}$ 的笛卡尔集(cartesian product).

以 $A_{\text{sup}} \wedge B_{\text{sup}}$ 为基础,按如下融合算法 $\text{merge}(A_{\text{sup}}, B_{\text{sup}})$ 生成自动机 $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ ,并将其称为融合监督控制器.

### Step 1 初始化.

令

$$Q'_A := \{q_a | (q_a, q_b) \in Q_{A \cap B}\},$$

$$Q'_B := \{q_b | (q_a, q_b) \in Q_{A \cap B}\}.$$

令 $Q_{A \setminus \cap} := Q_A - Q'_A, Q_{B \setminus \cap} := Q_B - Q'_B$ .将 $Q_{A \setminus \cap}$ 中的状态重命名为 $(q_a, -)$ ,将 $Q_{B \setminus \cap}$ 中的状态重命名为 $(-, q_b)$ .

令

$$A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}} :=$$

$$(Q_{A \circ B}, \Sigma_{A \circ B}, \delta_{A \circ B}, (q_{0A}, q_{0B}), Q_{mA} \times Q_{mB}),$$

其中:  $Q_{A \circ B} := Q_{A \cap B} \cup Q_{A \setminus \cap} \cup Q_{B \setminus \cap}$ ;  $\Sigma_{A \circ B} = \Sigma_A \cup \Sigma_B$ ;  $\delta_{A \circ B}$ 为 $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ 的转移函数,并由Step 2中描述的方法生成.

**Step 2** 对 $A_{\text{sup}}$ 中的任意转移函数 $\delta_A(q_{a1}, \sigma) = q_{a2}$ ,其中 $q_{a1}, q_{a2} \in Q_A, \sigma \in \Sigma_A$ ,往 $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ 中添加转移函数

$$\delta_{A \circ B}((q_{a1}, *_1), \sigma) = (q_{a2}, *_2),$$

其中: 如果存在 $(q_{a1}, q_{b1}) \in Q_{A \cap B}$ 且 $\delta_B(q_{b1}, \sigma) = q_{b2} \in Q_B$ ,则 $*_1 = q_{b1}, *_2 = q_{b2}$ ;如果存在 $(q_{a1}, q_{b1}) \in Q_{A \cap B}$ 且 $\delta_B(q_{b1}, \sigma)$ 未定义,则 $*_1 = q_{b1}, *_2 = -$ ;否则 $*_1 = -, *_2 = -$ .

对 $B_{\text{sup}}$ 中的任意转移函数 $\delta_B(q_{b1}, \sigma) = q_{b2}$ ,其中 $q_{b1}, q_{b2} \in Q_B, \sigma \in \Sigma_B$ ,往 $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ 中添加转移函数

$$\delta_{A \circ B}(*_1, q_{b1}, \sigma) = (*_2, q_{b2}),$$

其中: 如果存在 $(q_{a1}, q_{b1}) \in Q_{A \cap B}$ 且 $\delta_A(q_{a1}, \sigma) = q_{a2} \in Q_A$ ,则 $*_1 = q_{a1}, *_2 = q_{a2}$ ;如果存在 $(q_{a1}, q_{b1}) \in Q_{A \cap B}$ 且 $\delta_A(q_{a1}, \sigma)$ 未定义,则 $*_1 = q_{a1}, *_2 = -$ ;否则 $*_1 = -, *_2 = -$ .

### Step 3 令

$$Q_{mA} \times Q_{mB} :=$$

$$\{(q_{ma}, q_{mb}) | q_{ma} \in Q_{mA}, q_{mb} \in Q_{mB}\}.$$

将 $Q_{A \circ B}$ 中的状态重命名为 $0, 1, \dots, |Q_{A \circ B}| - 1$ ,其中状态0为初始状态 $(q_{0A}, q_{0B})$ , $|Q_{A \circ B}|$ 为状态集合 $Q_{A \circ B}$ 中的状态个数.

由于 $\text{merge}(A_{\text{sup}}, B_{\text{sup}})$ 算法遍历了 $A_{\text{sup}}$ 与 $B_{\text{sup}}$ 中的所有转移函数以生成 $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ 中的转移函数,因此该算法的时间复杂度为 $O(n_1 + n_2)$ ,其中 $n_1, n_2$ 分别为 $A_{\text{sup}}$ 与 $B_{\text{sup}}$ 中的转移函数个数.

由 $\text{merge}(A_{\text{sup}}, B_{\text{sup}})$ 算法的构造过程可知, $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ 的状态数将小于 $A_{\text{sup}}$ 与 $B_{\text{sup}}$ 状态数之和,即 $|Q_{A \circ B}| < |Q_A| + |Q_B|$ .merge算法的实质是以 $A_{\text{sup}}$ 与 $B_{\text{sup}}$ 的交集为基础,分别将 $A_{\text{sup}}$ 与 $B_{\text{sup}}$ 中不在 $A_{\text{sup}} \cap B_{\text{sup}}$ 中的部分加入 $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ 中,此过程对应该算法描述中的Step 2.当 $A_{\text{sup}}$ 与 $B_{\text{sup}}$ 无交集时,由于 $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ , $A_{\text{sup}}$ 与 $B_{\text{sup}}$ 的初始状态均用状态0表示,因此 $|Q_{A \circ B}| = |Q_A| + |Q_B| - 1$ .

将 $A_{\text{sup}}$ 与 $B_{\text{sup}}$ 的并集记作 $A_{\text{sup}} \cup B_{\text{sup}}$ .自动机 $A_{\text{sup}} \cup B_{\text{sup}}$ 与 $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ 的差别在于后者沿用了 $A_{\text{sup}}$ 和 $B_{\text{sup}}$ 中的公共部分,因此从集合 $Q_{A \circ B}$ 去掉集合 $\{(-, q_b) | (-, q_b) \in Q_{A \circ B}\}$ 中的所有状态以及与之相关的转移,所得结果即为 $A_{\text{sup}}$ .同理,从集合 $Q_{A \circ B}$ 去掉集合 $\{(q_a, -) | (q_a, -) \in Q_{A \circ B}\}$ 中的所有状态以及与之相关的转移,所得结果即为 $B_{\text{sup}}$ .而由 $A_{\text{sup}} \cup B_{\text{sup}}$ 无法直接得到 $A_{\text{sup}}$ 和 $B_{\text{sup}}$ .

进入系统的工件将在融合监督控制器 $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ 的监督控制下进行加工.由于工件可能经由不同的事件串使融合监督控制器进入相同的状态,而在该状态应根据特定的事件串做出相应的控制决策,因此仅有融合监督控制器仍不能满足控制要求.为了根据工件的加工情况选择相应的组件工作模式,对于任意状态 $q^\circ := (q_a, q_b) \in Q_{A \circ B}$ ,引入决策集 $\Sigma_{q^\circ} := D(q_a) \cup D(q_b)$ ,其中: $D(q_a)$ 为 $A_{\text{sup}}$ 中在状态 $q_a$ 被禁止的事件组成的集合, $D(q_b)$ 为 $B_{\text{sup}}$ 中在状态 $q_b$ 被禁止的事件组成的集合. $D(q_a)$ 与 $D(q_b)$ 可由TCT中的condat指令计算得到,并规定 $D(-) = \emptyset$ .

对于任意状态 $q^\circ := (q_a, q_b) \in Q_{A \circ B}$ ,同时引入对

应的工件信息集合  $W_{\text{Inf}}^{\circ} := \{(ID, q', \delta', P)\}$ , 其中  $ID \in \{1, 2, \dots\}$  为工件编号,  $q', \delta'$  分别为工件当前所在组件或缓冲区的当前状态与该组件或缓冲区对应自动机模型的转移函数,  $P$  为与组件工作模式选择有关的谓词(predicate), 如工件被重复加工的次数小于2次时相应事件才能被使能。

假设事件串  $s \in \Sigma_{A \circ B}^*$  发生后  $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$  的当前状态为  $q^{\circ} = \delta_{A \circ B}((q_{0A}, q_{0B}), s)$ . 系统将根据  $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$  中各状态对应的决策集和工件信息集合选择可控事件的发生. 定义在状态  $q^{\circ}$  的事件选择函数  $f: Q_{A \circ B} \rightarrow \Sigma_{A \circ B}$  为

$$f(q^{\circ}) = \{\sigma \in \Sigma_{A \circ B} | \sigma \in L(A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}), \sigma \notin \Sigma_{q^{\circ}}, \\ \exists (ID, q', \delta', P) \in W_{\text{Inf}}^{\circ} \text{ 使得 } \delta'(q', \sigma)!, \\ \sigma \models P\},$$

其中  $\sigma \models P$  表示事件  $\sigma$  的发生满足谓词  $P$ .

事件选择函数对应的物理意义为: 在状态  $q^{\circ}$  可发生的事件  $\sigma$  需满足:

- 1) 不被融合监督控制器禁止;
- 2) 该事件需对应于工件信息集中的某个具体工件的加工, 并且该事件发生后工件信息集中的元素将进行相应的更新;
- 3) 该事件的发生仍满足谓词  $P$ .

**定理 1** 融合监督控制器  $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$  为关于  $G_A$  与  $G_B$  可控的非阻塞监督控制器.

**证** 将监督控制器  $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ ,  $A_{\text{sup}}$  与  $B_{\text{sup}}$  中的不可控事件集合分别记作  $\Sigma_{A \circ B}^u$ ,  $\Sigma_A^u$ ,  $\Sigma_B^u$ .

首先证明  $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$  关于  $G_A$  可控, 即

$$(\forall s, \sigma) s \in L(A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}), \sigma \in \Sigma_{A \circ B}^u, \\ s\sigma \in L(G_A) \Rightarrow s\sigma \in L(A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}). \quad (1)$$

由于  $s \in L(A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}})$ , 根据  $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$  的生成过程可知  $s \in L(A_{\text{sup}})$  或  $L(B_{\text{sup}})$ . 由  $\sigma \in \Sigma_{A \circ B}^u$  可知  $\sigma \in \Sigma_A^u$  或  $\Sigma_B^u$ .

如果  $s \in L(B_{\text{sup}}) \setminus L(A_{\text{sup}})$  或  $\sigma \in \Sigma_B^u \setminus \Sigma_A^u$ , 由于条件  $s\sigma \in L(G_A)$  不成立, 因此式(1)自然成立. 如果  $s \in L(A_{\text{sup}})$  且  $\sigma \in \Sigma_{A \circ B}^u$ , 由于  $L(A_{\text{sup}})$  关于  $G_A$  可控, 因此  $s\sigma \in L(A_{\text{sup}})$ . 于是, 由自动机  $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$  的构造过程可知  $s\sigma \in L(A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}})$ .

$A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$  关于  $G_B$  可控的证明过程与证明  $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$  关于  $G_A$  可控的过程类似, 此处不再赘述.

然后证明  $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$  关于  $G_A$  与  $G_B$  非阻塞.

在  $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$  中的任意状态  $q^{\circ} \in Q_{A \circ B}$ , 由事件选择函数  $f(q^{\circ})$  的定义可知, 只有不被  $A_{\text{sup}}$  或  $B_{\text{sup}}$  禁止且满足谓词  $P$  的事件才能发生, 因此在事件选择函数  $f(q^{\circ})$  的作用下,  $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$  的运行不会造成阻塞.

证毕.

## 4 实例

以图1所示的带反馈功能的制造系统为例<sup>[7,9]</sup>, 演示第3节提出的组件多工作模式下的离散事件系统监督控制方法. 该系统由3个组件  $R$ ,  $M$ ,  $TU$  与2个缓冲区  $B1$ ,  $B2$  组成(假设两个缓冲区的容量均为1), 对应的各自动机模型如图1所示. 本文沿用TCT中的表示惯例, 用奇数与偶数分别代表可控与不可控事件.

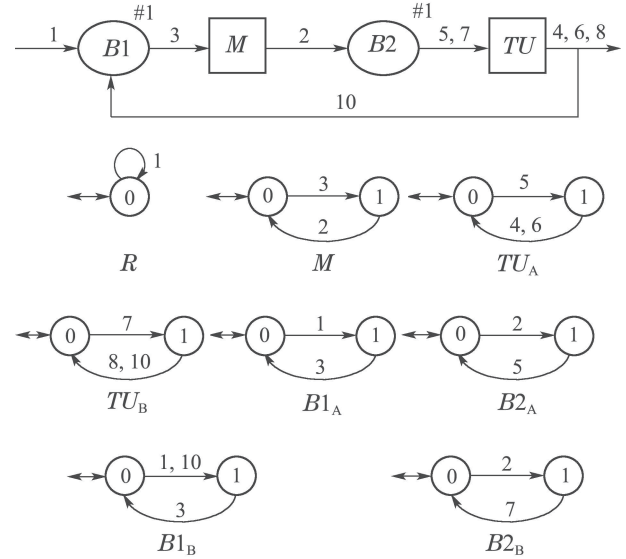


图1 带反馈功能的制造系统结构图

Fig. 1 Structure of the manufacturing system with feedback function

系统的工作方式为: 机器人  $R$  每次往缓冲区  $B1$  中放入一个工件(用事件1表示); 制造单元  $M$  从  $B1$  中取出工件进行加工(用事件3表示), 加工完毕后放入缓冲区  $B2$ (用事件2表示); 检测单元  $TU$  从缓冲区  $B2$  取工件进行检测, 并对应两种工作模式:

1) 如果该工件已被加工2次, 则检测单元  $TU$  工作在模式  $A$ , 即从缓冲区  $B2$  取工件进行检测(用事件5表示), 检测合格则将该工件作为正品输出(用事件4表示), 检测不合格则作为次品输出(用事件6表示). 模式  $A$  对应的自动机模型由图1中的自动机  $TU_A$  表示.

2) 如果该工件的加工次数未超过2次, 则检测单元  $TU$  工作在模式  $B$ , 即从缓冲区  $B2$  取工件进行检测(用事件7表示), 检测合格则将该工件作为正品输出(用事件8表示), 检测不合格则将该工件放入缓冲区  $B1$  中再次加工(用事件10表示). 模式  $B$  对应的自动机模型由图1中的自动机  $TU_B$  表示.

对应的性能指标为:

1) 防止缓冲区  $B1$ ,  $B2$  出现上溢与下溢;

2) 根据工件的加工次数选择  $TU$  的工作模式.

检测单元工作在  $A$  与  $B$  模式下对应的缓冲区  $B1$ ,  $B2$  自动机模型分别由图1中的自动机  $B1_A$ ,  $B2_A$  与

$B1_B, B2_B$ 所示. 由TCT计算可得

$$G_A = \text{sync}(R, M, TU_A),$$

$$G_B = \text{sync}(R, M, TU_B),$$

$$E_A = \text{sync}(B1_A, B2_A),$$

$$E_B = \text{sync}(B1_B, B2_B),$$

$$A_{\text{sup}} = \text{supcon}(G_A, E_A),$$

$$B_{\text{sup}} = \text{supcon}(G_B, E_B),$$

其中 $\text{sync}(\cdot)$ 为TCT中计算同步积的指令<sup>[18]</sup>.

模式A与模式B下对应的监督控制器分别为 $A_{\text{sup}}$ 与 $B_{\text{sup}}$ , 如图2与图3所示.

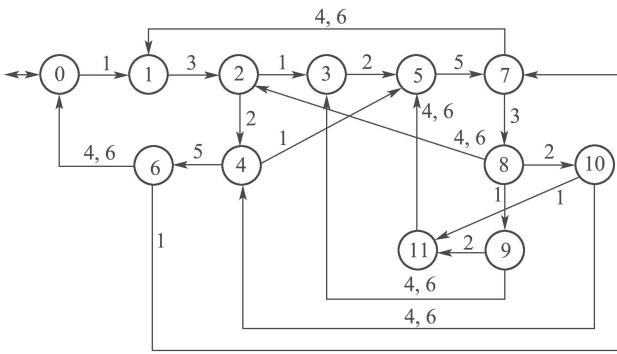


图2 监督控制器 $A_{\text{sup}}$ 状态转移图

Fig. 2 State transition graph of supervisor  $A_{\text{sup}}$

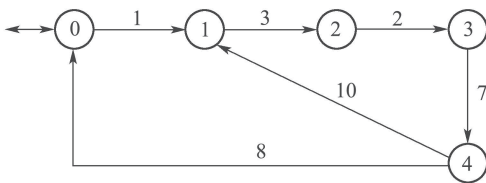


图3 监督控制器 $B_{\text{sup}}$ 状态转移图

Fig. 3 State transition graph of supervisor  $B_{\text{sup}}$

利用融合算法得到如图4所示的融合监督控制器 $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ , 其各状态对应的决策集如表2所示.

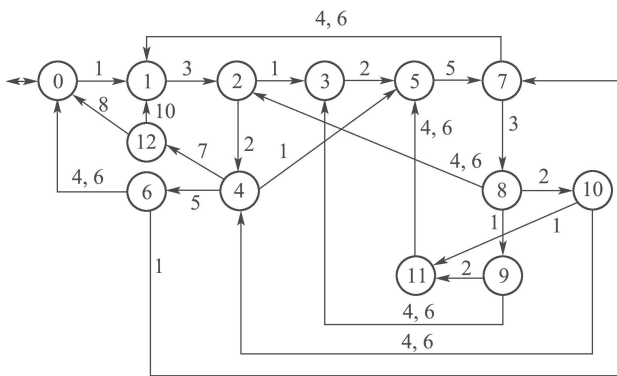


图4 融合监督控制器 $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ 状态转移图

Fig. 4 State transition graph of merged supervisor

$A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$

表2 状态与决策集对应关系表

Table 2 Relation between states and their decision sets

| 状态 | 决策集       | 状态 | 决策集         |
|----|-----------|----|-------------|
| 0  | {3, 5, 7} | 7  | {1}         |
| 1  | {1, 5, 7} | 8  | $\emptyset$ |
| 2  | {1, 5, 7} | 9  | {1}         |
| 3  | {1, 5}    | 10 | {3}         |
| 4  | {1, 3}    | 11 | {1, 3}      |
| 5  | {1, 3}    | 12 | {1, 3}      |
| 6  | {3}       |    |             |

假设事件串 $s \in \Sigma_{A \circ B}^*$ 发生后 $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ 的当前状态为 $q^\circ = \delta_{A \circ B}((q_{0A}, q_{0B}), s)$ . 根据性能指标2)的要求可得本例中的谓词 $P$ : 如果 $\#10(s) < 2$ , 则 $TU$ 工作在模式B, 事件7被使能; 否则,  $TU$ 工作在模式A, 事件5被使能, 其中 $\#10(s)$ 表示事件串 $s$ 中事件10发生的次数. 状态 $q^\circ$ 对应的工件信息集合用 $W_{\text{Inf}}^\circ := \{(ID, q', \delta', P)\}$ 表示. 缓冲区对应的工作模式亦由谓词 $P$ 决定.

假设事件串 $s = 1.3$ , 则 $q^\circ = 2$ ,  $W_{\text{Inf}}^\circ = \{(1, 1, \delta_M, P)\}$ , 其中第2项表示工件当前位于加工单元M中的状态1,  $\delta_M$ 表示加工单元M对应自动机模型的转移函数, 对于下文中出现的工件信息集合中对应项的含义均可按此方式理解. 由表2可知 $\Sigma_{q^\circ} = \{1, 5, 7\}$ ; 因此, 在状态2事件1不能发生, 从而事件选择函数 $f(2) = \{2\}$ . 如果在状态2事件1发生, 则从 $A_{\text{sup}} \circ B_{\text{sup}}$ 的初始状态出发经由事件串1.3.1.2将进入状态5. 但在状态5只有事件5能发生, 而事件5只有在事件10已经发生2次的情况下才能发生, 此时将出现阻塞, 即 $f(5) = \emptyset$ . 由此可见, 本文定义的事件选择函数能有效避免出现阻塞. 事件2发生后工件信息集合更新为 $W_{\text{Inf}}^\circ = \{(1, 1, \delta_{B2B}, P)\}$ .

假设事件串 $s = 1.3.2$ , 则 $q^\circ = 4$ ,  $W_{\text{Inf}}^\circ = \{(1, 1, \delta_{B2B}, P)\}$ . 由表2可知 $\Sigma_{q^\circ} = \{1, 3\}$ , 虽然在状态4事件5和7均有定义, 但由于谓词 $P$ 的作用, 此时事件选择函数 $f(4) = \{7\}$ , 即检测单元工作在模式B. 事件7发生后工件信息集合更新为 $W_{\text{Inf}}^\circ = \{(1, 1, \delta_{TUB}, P)\}$ .

假设事件串 $s = 1.3.2.7.10.3.2.7.10.3.2$ , 则 $q^\circ = 4$ ,  $W_{\text{Inf}}^\circ = \{(1, 1, \delta_{B2A}, P)\}$ , 即再次进入状态4. 由表2可知 $\Sigma_{q^\circ} = \{1, 3\}$ , 虽然在状态4事件5和7均有定义, 但由于谓词 $P$ 的作用, 此时事件选择函数 $f(4) = \{5\}$ , 即检测单元工作在模式A. 对应的物理意义为由于该工件已经经过了2次加工, 因此检测单元需工作在模式A.

为了描述的便利本文所给实例中缓冲区的容量为1, 可直接将第3节中的方法推广至缓冲区容量更大的情形.

将文献[7-15]中所提方法得到的监督控制器与本

例所得融合监督控制器相比, 可知解决相同问题融合监督控制器的状态数目少于文献中所得监督控制器, 主要原因是本文利用事件选择函数动态地选择满足要求的事件, 而文献中采用的是静态的状态抽象、近似等方法。

本文所提方法的另一个优势是能满足多个工件同时处于系统中的情形。将缓冲区 $B1$ 的容量扩大为2, 则 $TU$ 工作在模式 $A$ 与模式 $B$ 时缓冲区 $B1$ 对应的自动机模型变更为图5所示。融合监督控制器与状态决策集也将相应发生变化, 由于计算过程与上文类似, 此处不再赘述。此时, 如果事件串1.1发生, 则系统中将有2个工件, 对应的工件信息集合为 $W_{\text{Inf}}^{\circ} = \{(1, 2, \delta_{B1B}, P), (2, 1, \delta_{B1B}, P)\}$ 。由于此时的事件选择函数允许事件3发生, 假设工件1先进行加工, 则事件3发生后工件信息集合更新为 $W_{\text{Inf}}^{\circ} = \{(1, 1, \delta_M, P), (2, 1, \delta_{B1B}, P)\}$ 。此后, 系统将在融合监督控制器与事件选择函数的共同作用下继续运行。

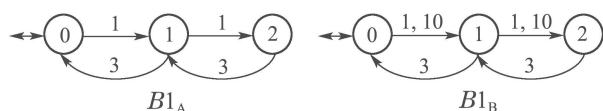


图5 缓冲区 $B1$ 状态转移图

Fig. 5 State transition graphs of buffer  $B1$

## 5 结论

本文提出了一种组件存在多种工作模式的离散事件系统监督控制方法, 通过利用各工作模式下系统对应的监督控制器生成融合监督控制器。系统将在融合监督控制器的作用下根据当前状态的决策集和工件信息集合得到事件选择函数的输出值, 从而决定下一步可发生的事件。相比于文献[7–15]中提出的变量抽象、近似等方法, 本文所提方法更直观简便, 并且本文所提方法能适应多个工件同时处于系统中的情形。

## 参考文献:

- [1] WONHAM W M, CAI K. *Supervisory Control of Discrete-Event Systems*. Springer: New York, 2019.
- [2] ZHENG Dazhong, ZHAO Qianchuan. *Discrete Event Dynamic Systems*. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (郑大钟, 赵千川. 离散事件动态系统. 北京: 清华大学出版社, 2001.)
- [3] RAMADGE P J, WONHAM W M. Supervisory control of a class of discrete event processes. *SIAM Journal on Control & Optimization*, 1987, 25(1): 206 – 230.
- [4] CASSANDRAS C G, LAFORTUNE S. *Introduction to Discrete Event Systems*. 2nd edition. New York: Springer-Verlag, 2008.
- [5] LIU Fuchun, CAI Jiade. Safe diagnosability of timed discrete-event systems. *Control and Decision*, 2017, 32(11): 2081 – 2084. (刘富春, 蔡家德. 赋时离散事件系统的安全诊断. *控制与决策*, 2017, 32(11): 2081 – 2084.)
- [6] JIAO Ting, GAN Yongmei, XIAO Guochun, et al. Study on relabeling observer property in symmetric discrete-event systems. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(4): 525 – 532. (焦亨, 甘永梅, 肖国春, 等. 对称离散事件系统事件重标记观测器性质研究. *控制理论与应用*, 2017, 34(4): 525 – 532.)
- [7] PENA P N, CURY J E R, LAFORTUNE S. Verification of nonconflict of supervisors using abstractions. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(12): 2803 – 2815.
- [8] TEIXEIRA M, MALIK R, CURY J E R, et al. Supervisory control of DES with extended finite-state machines and variable abstraction. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60(1): 118 – 129.
- [9] TEIXEIRA M, MALIK R, CURY J E R, et al. Variable abstraction and approximations in supervisory control synthesis. *Proceedings of American Control Conference*. Washington, DC, USA: IEEE, 2013: 132 – 137.
- [10] CURY J E R, DE QUEIROZ M H, BOUZON G, et al. Supervisory control of discrete event systems with distinguishers. *Automatica*, 2015, 56: 93 – 104.
- [11] AGUIAR R S S, CUNHA A E C, CURY J E R, et al. Heuristic search of supervisors by approximated distinguishers. *Proceedings of the 4th IFAC Workshop on Dependable Control of Discrete Systems*. York, UK: IFAC, 2013: 121 – 126.
- [12] BOUZON G, DE QUEIROZ M H, CURY J E R. Supervisory control of DES with distinguishing sensors. *Proceedings of the 9th International Workshop on Discrete Event Systems*. Goteborg, Sweden: IEEE, 2008: 22 – 27.
- [13] BOUZON G, DE QUEIROZ M H, CURY J E R. Exploiting distinguishing sensors in supervisory control of des. *Proceedings of IEEE International Conference on Control and Automation*. Christchurch, New Zealand: IEEE, 2009: 442 – 447.
- [14] ROSA M, TEIXEIRA M, MALIK R. Exploiting approximations in supervisory control with distinguishers. *IFAC—PapersOnline*, 2018, 51(7): 13 – 18.
- [15] TEIXEIRA M, CURY J E R, DE QUEIROZ M H. Local modular control with distinguishers applied to a manufacturing system. *Proceedings of the 7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control*. Saint Petersburg, Russia: IFAC, 2013: 263 – 268.
- [16] FARAUT G, PIETRAC L, NIEL E. Formal approach to multimodal control design: application to mode switching. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2009, 5(4): 443 – 453.
- [17] JIAO T, GAN Y M, XIAO G C, et al. Exploiting symmetry of discrete-event systems by relabeling and reconfiguration. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, DOI: 10.1109/TSMC.2018.2795011.
- [18] WONHAM W M. *Design Software: TCT*. Toronto: Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, 2017. [2017–05–01]. <http://www.control.utoronto.ca/DES/Research.html>.

## 作者简介:

焦亨 博士, 讲师, 目前研究方向为离散事件系统监督控制理论, E-mail: tjiao@sxu.edu.cn;

刘振国 博士, 副教授, 目前研究方向为非线性系统理论, E-mail: lzg819@163.com.