

对称离散事件系统事件重标记观测器性质研究

焦 亭¹, 甘永梅^{1†}, 肖国春¹, WONHAM W M²

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 多伦多大学 电气与计算机工程学院, 加拿大 多伦多 M5S 3G4)

摘要: 当离散事件系统(discrete-event systems, DES)由多组结构相同的组件构成时, 则称离散事件系统具有对称性. 为了化简对称离散事件系统的状态空间, 本文提出事件重标记映射, 将完成相同任务的事件标记为同一事件, 将与控制无关的不可控事件设为不可观测事件, 并将其标记为空字符擦除. 为了确保事件重标记前后系统对应的最大监督控制器具有相同的控制效果, 本文引入重标记观测器(relabeling observer property, ROP)的概念并给出判断被控对象对应的语言关于事件重标记映射是否具有重标记观测器性质的算法; 然后运用重标记观测器性质证明事件重标记前后监督控制器控制效果的等价性, 从而可用简化后的监督控制器实现与事件重标记操作前相同的控制任务. 最后通过实例验证所提理论的正确性.

关键词: 离散事件系统; 监督控制理论; 对称性; 事件重标记

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Study on relabeling observer property in symmetric discrete-event systems

JIAO Ting¹, GAN Yong-mei^{1†}, XIAO Guo-chun¹, WONHAM W M²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China;

2. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, Toronto M5S 3G4, Canada)

Abstract: Symmetry arises when discrete-event systems (DES) consist of groups of identical components. To reduce the state space of symmetric DES, the event relabeling map is proposed in this paper. The event relabeling map relabels all events fulfilling the same task to one symbol and treats uncontrollable events irrelevant to control as unobservable events. Then the unobservable events are erased by relabeling them to the empty symbol. To ensure that the supremal controller remains control-equivalent after relabeling, the concept of relabeling observer property (ROP) is proposed, as well as steps to determine whether certain languages have this property. Based on the ROP, we show that the original supervisor and its relabeled counterpart are equivalent in control action. Namely, the reduced supervisor in the relabeled system achieves the same control goal as the supervisor in the original system before relabeling. Finally, examples are given to illustrate the validity of the proposed approach.

Key words: discrete-event systems; supervisory control theory; symmetry; event relabeling

1 引言(Introduction)

很多较大规模系统由多组具有相同结构(对称性)的组件构成, 因此对于每组中的各组件只需施加同一控制律. 在数学及物理学中, 对称性的概念也被广泛运用以简化系统模型与相关运算, 例如量子物理中运用排列群或旋转群进行模型化简^[1-2], 控制理论线性系统负反馈中利用控制矩阵不变性研究系统可控性问题^[3], 数学中利用函数的对称性研究Lie代数与嫡函数^[4-5].

在由Ramadge与Wonham建立的离散事件系统监督控制理论^[6-9]中, 文献[10-11]利用群理论提取由结

构相同组件串联而成的离散事件系统的对称性, 通过构建商自动机得到状态数更少的集中监督控制器. 对于由同一自动机模板生成的离散事件系统, 文献[12]给出了将全局模型在多项式时间复杂度内分解为多个子系统的实现过程, 文献[13]分析了系统的死锁与阻塞问题, 文献[14]提出了基于广播方式且满足交换律与结合律的系统合成运算算法, 文献[15]研究由结构相同的电池组成的离散事件系统的自诊断问题. 此外, 文献[16]利用同步方法化简分布式离散事件系统的可诊断性判定问题, 文献[17]研究由多个结构相同机器人组成的离散事件系统的协调控制问题, 文

收稿日期: 2016-03-23; 录用日期: 2017-03-02.

[†]通信作者. E-mail: ymgan@mail.xjtu.edu.cn; Tel.: +86 29-82666241.

本文责任编辑: 赵千川.

中国国家留学基金项目(2014[3026])资助.

Supported by China Scholarship Council (2014[3026]).

献[18]通过局部控制目标之间的对称性实现离散事件系统的无死锁分散监控。

针对构建商自动机以减少对称离散事件系统状态数的方法存在实现过程复杂,且所得的监督控制器需经转换后才能用于监督控制等问题,本文提出利用事件重标记映射对由结构相同组件并行连接而成的对称离散事件系统进行化简并考虑部分事件可观测的情况。在Petri网中,文献[19]针对部分可观Petri网设计在线诊断控制器;文献[20]将部分可观Petri网结构信息应用于故障诊断问题中;文献[21–22]基于部分可观Petri网的结构特点分别研究了高铁进出站控制系统与机车调度系统的故障诊断。在利用事件重标记映射对系统结构进行化简后,本文提出事件重标记映射观测器性质以确保事件重标记前后,系统对应的最大监督控制器具有相同的控制效果。

本文所研究的监督控制问题需满足防止缓冲区上溢与下溢的性能指标。在实现工件搬运、加工等操作的柔性制造系统或配置有自动导向车(automated guided vehicles, AGV)的物流系统中,缓冲区常用于存储待加工或已加工完成的工件,这类系统的可靠运行主要包括:

1) 防止缓冲区出现下溢,即在缓冲区中无工件的情况下,禁止加工中心或AGV小车等尝试从缓冲区中取工件;

2) 防止缓冲区出现上溢,即在缓冲区中现有工件数量达到缓冲区容量的情况下,禁止加工中心或AGV小车等向缓冲区中放入工件。

文献[23–25]主要研究缓冲区容量的动态配置问题以获得缓冲区容量的最优配置方案,文献[26]采用赋时Petri网对生产单元缓冲区进行建模。文献[27–29]采用参数化模板和谓词表达式避免缓冲区出现上溢与下溢。本文主要研究当多个结构相同组件同时往容量固定的缓冲区中放入或取出工件时,如何设计结构简化的监督控制器以避免缓冲区出现上溢与下溢。由于缓冲区是柔性制造系统与物流系统中的重要组成单元,而且加工中心与AGV小车往往具有相同的结构,因此,研究对称离散事件系统中防止缓冲区上溢与下溢的监督控制问题对于实现包含缓冲区的对称离散事件系统的可靠运行具有重要意义。

本文余下部分的结构为:第2节介绍了与本文有关的基本概念;第3节描述了对称离散事件系统的结构,并采用事件重标记映射化简对称离散事件系统;第4节提出了事件重标记观测器性质的概念,判定方法以及证明了事件重标记前后系统最大监督控制器的等价性;第5节演示了事件重标记观测器性质的判定过程,并以一个制造系统为例验证了第4节中所提方法

的正确性;第6节总结全文。

2 系统描述(Description of systems)

2.1 DES自动机模型(Automaton model of DES)

离散事件系统^[6–8]利用自动机对系统进行建模,自动机通常可表示为5元组:

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

其中: Q 为状态集合; Σ 为事件集合,可划分为不可控事件集合 Σ_u 与可控事件集合 Σ_c ; $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$ 用于描述系统中状态的变迁关系,称作转移函数; q_0 为初始状态; $Q_m \subseteq Q$ 为标识状态集合。一般地,转移函数可扩展为 $\delta: Q \times \Sigma^* \rightarrow Q$,其中 Σ^* 表示 Σ 上所有有限长度事件串组成的集合(包含空事件串 ε);于是对任意事件串 $s \in \Sigma^*$,用 $\delta(q_0, s)!$ 表示 $\delta(q_0, s)$ 有定义。

定义 G 所表示语言的闭性质(closed behavior)为

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

标识性质(marked behavior)为

$$L_m(G) = \{s \in \Sigma^* | \delta(q_0, s) \in Q_m\}.$$

如果对于 G 中任意状态 $q \in Q$ 均存在事件串 $s \in \Sigma^*$ 使得 $\delta(q, s)!$,则称 G 可达(reachable)。如果对于 G 中任意状态 $q \in Q$ 均存在事件串 $s \in \Sigma^*$ 使得 $\delta(q, s) \in Q_m$,则称 G 协同可达(coreachable)。如果 G 既可达又协同可达,则称 G 整齐(trim)。

上述定义的自动机为确定有限状态自动机,也可定义不确定有限状态自动机为

$$H = (Q, \Sigma, \eta, q_0, Q_m).$$

除转移函数之外, H 中其他项定义均与 G 中相同。此处转移函数 $\eta: Q \times \Sigma \rightarrow Pwr(Q)$ 可定义为

$$\eta(q, \varepsilon) = \{q\},$$

$$\eta(q, s\sigma) = \cup\{\eta(q', \sigma) | q' \in \eta(q, s)\},$$

其中 $Pwr(\cdot)$ 表示幂集。由不确定有限状态自动机转移函数的定义可知从一个状态出发,经相同的事件允许到达多个状态。

对任意语言 $K \subseteq \Sigma^*$,如果满足

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

则称 K 关于 G 可控。

假定性能指标用 $E \subseteq \Sigma^*$ 表示,关于被控对象 G 可控且满足性能指标 E 的可控语言类可表示为

$$\mathcal{C}(E) = \{K \subseteq E | K \text{关于} G \text{可控}\}. \quad (1)$$

由于 $\mathcal{C}(E)$ 构成向上的半晶格结构^[6],因此 $\mathcal{C}(E)$ 存在上确界 $\sup \mathcal{C}(E) := \cup\{K | K \in \mathcal{C}(E)\}$ 。

自动机 G 中的事件集合除了可划分为可控事件集合与不可控事件集合外,也可划分为可观测事件集合

Σ_o 与不可观测事件集合 Σ_{uo} . 定义自然映射(natural projection) $P: \Sigma^* \rightarrow \Sigma_o^*$ 为

$$\begin{cases} P(\varepsilon) = \varepsilon, \\ P(\alpha) = \begin{cases} \varepsilon, & \alpha \notin \Sigma_o, \\ \alpha, & \alpha \in \Sigma_o, \end{cases} \\ P(s\alpha) = P(s)P(\alpha), \end{cases} \quad (2)$$

其中 ε 表示空字符(empty symbol). 自然映射用于擦除事件串中的不可观测事件.

2.2 拟同余与最优拟同余 (Quasi-congruence and optimal quasi-congruence)

对于不确定有限状态自动机 H , 可对其状态集合 Q 进行等价划分, 所有的等价划分关系组成集合 $\mathcal{E}(Q)$. 对任意等价关系 $\pi \in \mathcal{E}(Q)$ 可定义标准映射 $P_\pi: Q \rightarrow Q/\pi$, 其中 Q/π 为集合 Q 关于 π 的商集. 如果对所有状态 $q, q' \in Q$,

$$\begin{aligned} P_\pi(q) = P_\pi(q') &\Rightarrow \\ (\forall \alpha \in \Sigma_o) P_\pi \eta(q, \alpha) &= P_\pi \eta(q', \alpha), \end{aligned} \quad (3)$$

则称 π 为 H 上的拟同余关系.

记 $QC := \{\pi \in \mathcal{E}(Q) | \pi \text{ 为 } H \text{ 上的拟同余关系}\}$, 因集合 QC 在并运算 \vee 作用下封闭^[30], 所以 QC 在并运算 \vee 作用下构成一个向上的半晶格, 且在 QC 中存在最优拟同余关系 $\rho := \sup QC$. 假定 $\pi_0 \in QC$, 对所有 $n > 1$, 计算

$$\rho_n = \rho_{n-1} \wedge \bigwedge \{\rho_{n-1} \circ \eta(\cdot, \alpha) | \alpha \in \Sigma_o\}, \quad (4)$$

其中: 符号“ \circ ”表示复合运算, “ \wedge ”表示关系交运算. 经过反复迭代可得 $\rho_\infty := \lim \rho_n (n \rightarrow \infty)$; 因本文讨论的自动机模型为有限状态自动机, 所以该迭代过程在有限步内收敛, 使得 $\rho_n = \rho_{n-1}$, 即 $\rho_\infty = \rho_n$, 称 ρ_n 为 Q 上的最优拟同余关系. 利用最优拟同余关系作用于 $H(\text{mod } \rho)$ 可得 H 的拟同余典型型 \bar{H} .

3 对称离散事件系统及事件重标记映射 (Symmetric discrete-event systems and event relabeling map)

对称离散事件系统往往由多组具有相同结构的组件(加工单元)组成. 如图1所示的小型制造系统, 依据组件所实现的功能可将其中的组件划分为2组:

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_1 &= \{I_i\}, i \in \{1, \dots, m\}, \\ \mathcal{G}_2 &= \{O_j\}, j \in \{1, \dots, n\}, \end{aligned}$$

其中: m, n 为任意正整数; 输入侧加工单元 I_i 中的事件 $1i1$ 与 $1i2$ 分别代表从输入侧取工件与加工完毕将工件放入缓冲区中; 输出侧加工单元 O_j 中的事件 $2j1$ 与 $2j2$ 分别代表从缓冲区中取工件与加工完毕将工件输出. 满足防止缓冲区上溢或下溢的性能指标只需获知处在工作状态的输入侧组件数量与缓冲区中

现有工件数量, 而无需了解各组件详细的事件信息, 因此可将事件 $1i1, 1i2, 2j1, 2j2$ 分别标记为同一事件, 如分别标记为 $11, 12, 21, 22$, 从而通过减少系统总的状态数达到简化系统结构的目的.

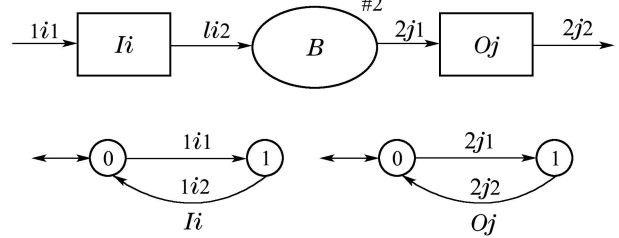


图 1 小型制造系统示意图

Fig. 1 Schematic of a small manufacturing system

注 1 输入侧加工单元 I_i 与输出侧加工单元 O_j 虽然结构相同, 但两者所实现的功能不同, I_i 将加工完成的工件放入缓冲区中, O_j 从缓冲区中取出工件进行进一步加工; 如果将 I_i 与 O_j 进一步进行事件重标记操作, 会导致因不能区分缓冲区中工件的放入与取出过程而无法防止缓冲区出现上溢与下溢的性能指标, 因此对于所实现功能不同的组件即使结构相同也不能进一步进行事件重标记操作.

假设被控对象 $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$ 整齐, 其中 $\Sigma = \Sigma_o \dot{\cup} \Sigma_{uo}$, $\Sigma_r = \Sigma_o$ 为将被进行重标记操作的事件集合, Σ_{uo} 为不可观测事件集合. 令 $T = T_c \dot{\cup} T_u$ 表示重标记后的事件集合, 定义事件重标记映射 $R: \Sigma^* \rightarrow T^*$ 使其满足以下条件:

$$\begin{cases} R(\varepsilon) = \varepsilon, \\ R(\sigma) = \varepsilon, \sigma \in \Sigma_{uo}, \\ R(\sigma) \in T_u, \sigma \in \Sigma_u, \\ R(\sigma) \in T_c, \sigma \in \Sigma_c, \\ R(s\sigma) = R(s)R(\sigma), s \in \Sigma^*, \sigma \in \Sigma. \end{cases} \quad (5)$$

事件重标记映射 R 将不可观测事件重标记为 ε , 且要求可控事件经重标记后仍为可控事件, 不可控事件经重标记后仍为不可控事件. 事件重标记映射 R 的自动机实现过程如图2所示, 令

$$\begin{aligned} G &= (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m), \\ RG &= (Z, T, \zeta, z_0, Z_m), \end{aligned}$$

其中 $\text{rep}(\cdot)$ 的结果代表自动机对应的语言.

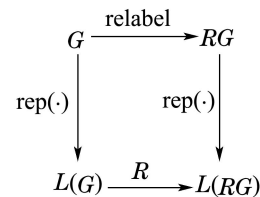


图 2 事件重标记映射及其实现示意图

Fig. 2 Schematic of the relabeling map and its implementation

本文使用TCT^[31]中改进后的 $\text{relabel}(\cdot)$ 算法计算 $(RG, H) = \text{relabel}(G)$ 使得 RG 满足

$$\begin{aligned} L_m(RG) &= RL_m(G), \\ L(RG) &= RL(G). \end{aligned}$$

改进后的 $\text{relabel}(\cdot)$ 算法的计算过程如下:

步骤1 将自动机 G 中所有不可观测事件标记为 ε , 其余事件按事先制定的重标记规则进行标记, 将所得结果记为 H ;

步骤2 将步骤1中经事件重标记后得到的不确定有限状态自动机 H 通过子集生成算法^[32]转换为确定有限状态自动机, 所得结果即为 RG .

子集生成算法的功能为将不确定有限状态自动机转换为与其等价(表示语言相同)的确定有限状态自动机. 由于步骤1中的操作在多项式时间内完成, 因此改进后的 $\text{relabel}(\cdot)$ 算法的时间复杂度与子集生成算法的时间复杂度一样, 均为 $\mathcal{O}(2^n)$, 其中 n 为 G 的状态数. 但是在具有对称性的离散事件系统中, 由于结构相同组件中完成相同任务的事件被重标记为同一事件, 因此 RG 的状态数往往比 G 的状态数少很多.

4 事件重标记前后控制器等价性(Control equivalence of supervisors before and after relabeling)

利用事件重标记映射对被控对象化简后, 可计算化简后系统对应的监督控制器, 本节主要讨论如何使事件重标记前后的监督控制器具有相同的控制效果.

4.1 问题描述(Problem description)

假定被控对象为 G , 性能指标为 E 且

$$\begin{aligned} L_m(S) &:= \sup \mathcal{C}(L_m(G) \cap E), \\ L_m(RG) &:= R(L_m(G)), \\ L_m(XRS) &:= \sup \mathcal{C}(L_m(RG) \cap R(E)), \\ L_m(RS) &:= R(L_m(S)) = \\ &\{R(s) \in L_m(RG) | s \in L_m(S)\}. \end{aligned}$$

事件重标记前后系统对应的最大监督控制器分别为 S 与 XRS , 为了使两监督控制器具有相同的控制效果, 即 $L_m(RS) = L_m(XRS)$, 本文首先引入事件重标记观测器性质, 然后利用该性质证明 $L_m(RS) = L_m(XRS)$.

4.2 事件重标记观测器性质的定义及计算(Definition and computation of relabeling observer property)

假定子语言 $K \subseteq L_m(G)$, 如果事件重标记映射 R 关于 K 满足

$$\begin{aligned} (\forall s \in \Sigma^*, t \in T^*) s \in \bar{K} \ \& \ R(s)t \in R(L_m(G)) \Rightarrow \\ (\exists s' \in \Sigma^*) R(s') &= t \ \& \ ss' \in L_m(G), \end{aligned} \quad (6)$$

则称 R 关于 K 具有事件重标记观测器(relabeling observer property, ROP)性质.

事件重标记观测器性质是对观测器性质^[6]的推广, 其实质是对于任意进行事件重标记后的事件串 $R(s) \in R(\bar{K}) \subseteq R(L_m(G))$, 如果事件串 t 的发生能使其进入标识状态, 即 $R(s)t \in R(L_m(G))$, 则一定存在事件串 $s' \in \Sigma^*$ 使得 s' 能被重标记为 t 且 s' 的发生也能进入标识状态.

根据事件重标记观测器性质的定义可知: 对任意 $K \subseteq L_m(G)$, 如果 R 关于 $L_m(G)$ 具有ROP性质, 则 R 关于 K 具有ROP性质.

给定自动机 G , 下面介绍如何判断事件重标记映射 R 关于 $L_m(G)$ 是否具有ROP性质.

首先对被控对象 G 各转移函数中的事件直接进行事件重标记, 将所得结果记为

$$H = (Q, T, \eta, q_0, Q_m).$$

引入事件 $\mu \notin \Sigma$, 在 H 中各标识状态 $q \in Q_m$ 添加自转移 (q, μ, q) . 经过该操作后 H 可表示为

$$H' = (Q, T \cup \{\mu\}, \eta', q_0, Q_m).$$

可选用TCT中的

$$\bar{H} := \text{supqc}(H', [\text{NULL EVENTS}])$$

算法验证事件重标记映射 R 关于 G 是否具有ROP性质, 其中NULL EVENTS为所有不可观测事件组成的集合, \bar{H} 表示 H 的拟同余典范型. 如果所返回的结果 \bar{H} 为结构确定自动机, 则 R 关于 G 具有ROP性质; 否则不具有ROP性质.

定理1 事件重标记映射 R 关于 $L_m(G)$ 具有ROP性质当且仅当 \bar{H} 为结构确定自动机.

定理1的证明可参见文献[6].

ROP性质的具体计算过程将通过第5.1节中的实例演示.

4.3 对称离散事件系统可控性(Controllability of symmetric DES)

在引入事件重标记观测器性质后, 接下来证明事件重标记前后系统最大监督控制器的等价性. 首先证明2个引理.

引理1 $R(\overline{L_m(S)}) = \overline{L_m(RS)}$, 即 $R(\overline{L_m(S)}) = \overline{R(L_m(S))}$.

证 (\subseteq) 令 $t \in R(\overline{L_m(S)})$. 则存在事件串 $s \in \overline{L_m(S)}$ 使得 $R(s) = t$. 因此存在事件串 $w \in \Sigma^*$ 使得 $sw \in L_m(S)$. 故 $R(sw) = tR(w) \in R(L_m(S))$, $t \in \overline{R(L_m(S))}$.

(\supseteq) 令 $t \in \overline{R(L_m(S))}$. 则存在事件串 $w \in T^*$ 使得 $tw \in R(L_m(S))$. 因此存在 $sv \in L_m(S)$ 使得 $R(sv) = tw$, 其中 $R(s) = t$, $R(v) = w$. 从而 $s \in \overline{L_m(S)}$, 可得 $t \in R(\overline{L_m(S)})$.

$$= R(s) \in R(\overline{L_m(S)}).$$

假设语言 $F \subseteq L(RG)$ 为关于 $L(RG)$ 可控的子语言. 定义语言 $K \subseteq L(G)$ 使得 $F = R(K)$ 为

$$K := R^{-1}(F) \cap L(G) = \{s \in L(G) | R(s) \in F\}. \quad (7)$$

引理 2 如果事件重标记映射 R 关于 K 具有 ROP 性质, 其中 K 如式(7)所示, 则

$$\overline{R^{-1}(F) \cap L(G)} = R^{-1}(\overline{F}) \cap L(G).$$

证 (\subseteq) 此方向总成立.

(\supseteq) 令 $s \in R^{-1}(\overline{F}) \cap L(G)$, 则 $t = R(s) \in \overline{F}$. 因此存在事件串 $w \in T^*$ 使得 $tw \in F \subseteq L(RG)$. 由于 R 关于 K 具有 ROP 性质, 则存在事件串 $v \in \Sigma^*$ 使得 $sv \in L(G)$, $R(sv) = tw$.

因此 $sv \in R^{-1}(F) \cap L(G)$, 即 $s \in \overline{R^{-1}(F) \cap L(G)}$.

为了研究的便利, 本文假定所有可控事件均为可观测事件. 假定性能指标 E 具有重标记正则性质 (relabeling normality property, RNP), 即 $E = R^{-1}(R(E))$. 重标记正则特性的实质是对于性能指标 E , 事件重标记映射具有逆映射不变性.

定理 2 如果事件重标记映射 R 关于 $L_m(S)$ 具有 ROP 性质且性能指标 E 具有 RNP 性质, 则 $L_m(RS) = L_m(XRS)$.

证 首先证明 $L_m(RS)$ 关于 $L(RG)$ 可控, 即

$$\begin{aligned} (\forall t, \tau) t \in \overline{L_m(RS)}, \tau \in T_u, \\ t\tau \in L(RG) \Rightarrow t\tau \in \overline{L_m(RS)}. \end{aligned}$$

令 $t \in \overline{L_m(RS)}$, $\tau \in T_u$, $t\tau \in L(RG)$. 由引理1可知 $t \in R(\overline{L_m(S)})$. 因此存在事件串 $s \in \overline{L_m(S)}$ 使得 $R(s) = t$. 由于 R 关于 $L_m(S)$ 具有 ROP 性质, 则存在事件 $\sigma \in \Sigma_u$ 使得 $R(\sigma) = \tau$, $s\sigma \in L(G)$. 由于 $L_m(S)$ 关于 $L(G)$ 可控, 可得 $s\sigma \in \overline{L_m(S)}$. 所以 $R(s\sigma) = t\tau \in R(\overline{L_m(S)}) = \overline{L_m(RS)}$.

接下来证明 $L_m(RS)$ 为最大可控子语言, 即证明对任意关于 $L(RG)$ 可控的子语言 $F \subseteq L(RG)$, 均有 $F \subseteq L_m(RS)$. 定义

$$K := R^{-1}(F) \cap L(G) = \{s \in L(G) | R(s) \in F\}.$$

首先证明 K 可控, 即

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

令 $t := R(s)$, $\tau := R(\sigma)$. 根据 \bar{K} 的定义有 $t \in \bar{F}$. 由于 $t\tau = R(s\sigma) \in L(RG)$, 根据 F 的可控性可知 $t\tau \in \bar{F}$. 因此由引理2可得

$$s\sigma \in R^{-1}(\bar{F}) \cap L(G) = \overline{R^{-1}(F) \cap L(G)} = \bar{K}.$$

另外, 由于 E 具有 RNP 性质, 可得

$$K = R^{-1}(F) \cap L(G) \subseteq R^{-1}R(E) \cap L(G) \subseteq E.$$

因为 $L_m(S)$ 是关于 $L(G)$ 的最大可控子语言, 所以 $R(K) = F \subseteq R(L_m(S)) = L_m(RS)$.

由定理2可知如果事件重标记映射 R 关于 $L_m(G)$ 具有 ROP 性质且性能指标 E 具有 RNP 性质, 则将关于 $L_m(G)$ 可控且满足性能指标 E 的最大可控子语言 K 进行事件重标记后, 所得结果 $R(K)$ 也是关于 $L_m(RG)$ 可控且满足性能指标 $R(E)$ 的最大可控子语言. $R(K)$ 的状态数往往比 K 的少很多, 因此在满足相同性能指标的前提下简化了控制器结构.

5 实例(Examples)

本节首先描述了被控对象对应的语言是否具有 ROP 性质的验证过程, 然后结合包含不可观测事件的对称离散事件系统验证事件重标记前后监督控制器的等价性.

5.1 ROP性质验证(Verification of the ROP)

本小节将通过图1所示对称离散事件系统演示语言是否具有 ROP 性质的验证过程, 为了能清晰地展示该验证过程, 此处仅考虑2个输入侧组件同步工作的情况. 拟同余关系计算过程中的中间结果如图3所示, 其中事件111, 121被重标记为11, 事件112, 122被重标记为12.

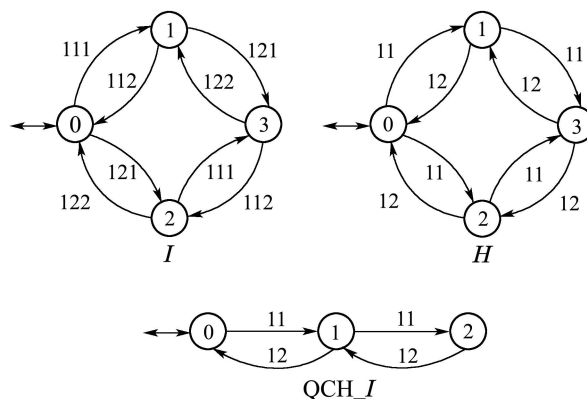


图3 拟同余关系计算示意图

Fig. 3 Schematic of the computation of quasi-congruence

具体TCT计算过程为

$$I1 = \text{create}^1(I1, [\text{mark } 0], [\text{tran}[0, 111, 1], [1, 112, 0]])(2, 2),$$

$$I2 = \text{create}(I2, [\text{mark } 0], [\text{tran}[0, 121, 1], [1, 122, 0]])(2, 2),$$

$$I = \text{sync}^2(I1, I2)(4, 8),$$

$$(RI, H) = \text{relabel}(I, [[111, 11], [112, 12], [121, 11], [122, 12]])(3, 4),$$

H 为对 I 直接进行事件重标记的结果. 在 H 中状态0

¹DES = create(DES)用于创建离散事件系统中的自动机模型以用于后续计算^[6].

²DES = sync(DES1, DES2, ..., DESk)用于计算k个自动机的同步积^[6].

添加事件 μ 的自转移并将所得结果记为 H' , 再利用 $\text{supqc}(\cdot)$ 算法寻找 H' 中的最优拟同余关系得到

$$QCH_I = \text{supqc}(H', \text{Null}[\], \text{QC}[[1, 2]])(3, 4).$$

具体的计算过程如下:

$$\begin{aligned} E_{11} &= \{0, 1, 2\}, Q - E_{11} = \{3\}, \\ E_{12} &= \{1, 2, 3\}, Q - E_{12} = \{0\}, \\ E_{\mu} &= \{0\}, Q - E_{\mu} = \{1, 2, 3\}, \\ \pi_0 &= E_{11} \wedge (Q - E_{11}) \wedge E_{12} \wedge \\ & (Q - E_{12}) \wedge E_{\mu} \wedge (Q - E_{\mu}) = \\ & \{\{0\}, \{1, 2\}, \{3\}\} =: \{A, B, C\}, \end{aligned}$$

其中 E_{α} 表示事件 $\alpha \in \{11, 12, \mu\}$ 可发生的状态组成的集合.

令 $\rho_0 = \pi_0$, 依照表1中的计算过程, 可得

$$\begin{aligned} \rho_1 &= \pi_0 \wedge \pi_0 \circ \eta(\cdot, 11) \wedge \pi_0 \circ \eta(\cdot, 12) \wedge \\ & \pi_0 \circ \eta(\cdot, \mu) = \\ & \{\{0\}, \{1, 2\}, \{3\}\} \wedge \{\{0\}, \{1, 2\}, \{3\}\} \wedge \\ & \{\{0\}, \{1, 2\}, \{3\}\} \wedge \{\{0\}, \{1, 2, 3\}\} = \\ & \{\{0\}, \{1, 2\}, \{3\}\} = \rho_0. \end{aligned}$$

\bar{H} 的状态转移图如图3中的 QCH_I 所示, 因其为结构确定自动机, 所以事件重标记映射关于 $L_m(I)$ 具有 ROP 性质.

表 1 最优拟同余关系计算过程³

Table 1 Computation process of the optimal quasi-congruence

q	η_{11}	η_{12}	η_{μ}	η'_{11}	η'_{12}	η'_{μ}
0	1, 2	\emptyset	0	B	\emptyset	A
1	3	0	\emptyset	C	A	\emptyset
2	3	0	\emptyset	C	A	\emptyset
3	\emptyset	1, 2	\emptyset	\emptyset	B	\emptyset

5.2 含不可观测事件的制造系统实例(Manufacturing system with unobservable events)

以图4中所示的制造系统为例, 系统由两组具有相同结构的加工单元构成, 可记为

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_1 &= \{I1, I2, I3\}, \\ \mathcal{G}_2 &= \{O1, O2, O3\}. \end{aligned}$$

输入侧的3个加工单元并行加工工件放入缓冲区中, 输出侧的3个加工单元并行从缓冲区中取工件进行进一步加工. 性能指标为防止如图4中所示的缓冲区 B 出现上溢或下溢. 假定缓冲区容量为2, 在状态0禁止事件 $2j1, j \in \{1, 2, 3\}$ 发生以防止缓冲区出现下溢(防止缓冲区为空时输出侧加工单元从缓冲区中取工

件); 在状态2禁止事件 $1i2, i \in \{1, 2, 3\}$ 发生以防止缓冲区出现上溢(在状态2缓冲区中已有两个工件, 如果事件 $1i2$ 再次发生则会导致缓冲区中工件数量超过缓冲区容量). 将事件 $1i1, 1i2, 2j1, 2j2$ 分别重标记为11, 12, 21, 22. 事件 $1i4, 1i6, 2j4, 2j6$ 因与性能指标无关, 将其设为不可观测事件. 由于加工单元 I_i 与 O_j 所实现功能不同, 因此不再将两者进行进一步事件重标记操作.

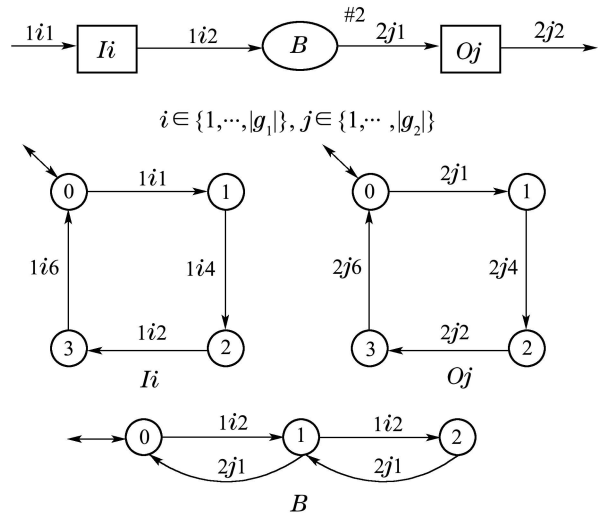


图 4 含不可观测事件的对称制造系统示意图
Fig. 4 Schematic of a symmetric manufacturing system with unobservable events

图4中各事件的含义如表2所示.

表 2 图4所示系统事件表

Table 2 Event table of the system shown in Fig.4

事件名称	所代表物理意义
1i1	加工单元 I_i 从输入侧取工件
1i4	加工单元 I_i 对工件进行加工
1i2	加工单元 I_i 将加工完毕的工件放入 B 中
1i6	加工单元 I_i 复位为下一个工作循环做准备
2j1	加工单元 O_j 从 B 中取工件
2j4	加工单元 O_j 对工件进行加工
2j2	加工单元 O_j 将加工完毕的工件输出
2j6	加工单元 O_j 复位为下一个工作循环做准备

被控对象 $G := (\parallel_{i=1}^{|\mathcal{G}_1|} I_i) \parallel (\parallel_{j=1}^{|\mathcal{G}_2|} O_j)$, 其中符号 \parallel 代表同步积运算, 在 TCT 中用 $\text{sync}(\cdot)$ 算法计算同步积. 利用 TCT 计算可得事件重标记前系统的最大监督控制器

$$S = \text{supcon}^4(G, B)(6144, 31104).$$

然后利用 $\text{relabel}(\cdot)$ 算法得到进行事件重标记后的被控对象 RG 与性能指标 RB , 并计算得到事件重标记后

³表中 $\eta_{\alpha} := \eta(q, \alpha), \eta'_{\alpha} := \pi_0 \circ \eta(q, \alpha), \alpha \in \{11, 12, \mu\}$.

⁴DES3 = $\text{supcon}(\text{DES1}, \text{DES2})$ 用于计算关于被控对象 DES1 可控且满足性能指标 DES2 的最大监督控制器^[6].

系统中的最大监督控制器 XRS :

$$\begin{aligned}(RG, HG) &= \text{relabel}(G), \\ (RB, HB) &= \text{relabel}(B), \\ XRS &= \text{supcon}(RG, RB)(24, 51),\end{aligned}$$

其中 HG 为对 G 直接进行事件重标记的结果, 不可观测事件均被标记为 $99(\varepsilon)$. 再用 supqc 算法验证事件重标记映射具有事件重标记观测器性质, 即

$$\begin{aligned}QC_G &= \text{supqc}(HG, \text{Null}[99]), \\ QC[\text{omitted}] &(16, 48).\end{aligned}$$

将对 S 直接进行事件重标记操作所得结果记作 RS , 验证 RS 与 XRS 是否同构, 即

$$\begin{aligned}(RS, HS) &= \text{relabel}(S)(24, 51), \\ \text{true} &= \text{isomorph}^5(RS, XRS).\end{aligned}$$

由于 RS 与 XRS 同构, 说明

$$L_m(RS) = L_m(XRS),$$

即验证了定理2. 对于自动机 B 描述的性能指标, 由于 $L(B) = R^{-1}(R(L(B)))$, 因此性能指标具有 RNP 性质. 由上述 TCT 计算可得

$$S = \text{supcon}(G, B)(6144, 31104),$$

即 S 中共有 6144 个状态, 31104 个转移函数; 而

$$(RS, HS) = \text{relabel}(S)(24, 51),$$

即 RS 中共有 24 个状态, 51 个转移函数. 对比 S 与 RS 的状态数可知对具有结构对称性的离散事件系统进行事件重标记操作可在很大程度上简化控制器结构. 该结果可以推广至任意数量输入侧与输出侧组件的情况.

6 结论(Conclusions)

本文利用事件重标记映射对具有对称性的离散事件系统进行化简, 描述了事件重标记映射的算法实现过程. 基于事件重标记映射提出了事件重标记观测器性质的概念, 并证明如果事件重标记映射关于系统对应的最大监督控制器具有事件重标记观测器性质且性能指标满足重标记正则性质, 则对系统进行事件重标记后所得的监督控制器能实现与系统进行事件重标记前相同的控制目标. 最后通过实例验证了所提理论的正确性.

参考文献(References):

- [1] WEYL H. *Symmetry* [M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1983.
- [2] WEYL H. *The Theory of Groups and Quantum Mechanics* [M]. New York: Dover Publications, 1950.
- [3] WONHAM W M. *Linear Multivariable Control – a Geometric Ap-*

proach [M]. New York: Springer-Verlag, 1985: 48 – 55.

- [4] ZHANG Xiaocai, ZHANG Yi. Lie symmetry and conserved quantity of fractional Lagrange system based on El-Nabulsi models [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2016, 55(3): 97 – 101.
(张孝彩, 张毅. 基于 El-Nabulsi 模型的分阶 Lagrange 系统的 Lie 对称性与守恒量 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(3): 97 – 101.)
- [5] CHEN Q, YEUNG R W. Partition-symmetrical entropy functions [J]. *Mathematics*, 2014, 62(10): 5385 – 5402.
- [6] WONHAM W M. *Supervisory control of discrete-event systems* [EB/OL]. Systems Control Group, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, 2016. [2016-07-01]. <http://www.control.toronto.edu/DES>.
- [7] WONHAM W M. *Supervisory control of discrete-event systems* [M] // BAILLIEUL J, SAMAD T. *Encyclopedia of Systems and Control*, London: Springer-Verlag, 2015: 1 – 10.
- [8] RAMADGE P J, WONHAM W M. Supervisory control of a class of discrete event processes [J]. *SIAM Journal on Control & Optimization*, 1987, 25(1): 206 – 230.
- [9] ZHENG Dazhong, ZHAO Qianchuan. *Discrete Event Dynamic Systems* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
(郑大钟, 赵千川. 离散事件动态系统 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.)
- [10] EYZELL J M, CURY J E R. Exploiting symmetry in the synthesis of supervisors for discrete event systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2001, 46(9): 1500 – 1505.
- [11] EYZELL J M, CURY J E R. Exploiting symmetry in the synthesis of supervisors for discrete-event systems [C] // *American Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998: 244 – 248.
- [12] ROHLOFF K, LAFORTUNE S. The verification and control of interacting similar discrete event systems [J]. *SIAM Journal on Control & Optimization*, 2006, 45(2): 634 – 667.
- [13] WANG W, SU R, LIN L. On analysis of deadlock and blocking freeness in isomorphic module systems [C] // *American Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 923 – 928.
- [14] SU R. Discrete-event modeling of multi-agent systems with broadcasting-based parallel composition [J]. *Automatica*, 2013, 49(11): 3502 – 3506.
- [15] CHEN Z Q, LIN F, WANG C S, et al. Active diagnosability of discrete event systems and its application to battery fault diagnosis [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(5): 1892 – 1898.
- [16] WANG Xiaoyu, OUYANG Dantong, CHI Jinjin, et al. Strategy in judging diagnosability of distributed discrete event systems [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2015, 45(5): 1541 – 1549.
(王晓宇, 欧阳丹彤, 迟晋进, 等. 分布式离散事件系统的可诊断性判定策略 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2015, 45(5): 1541 – 1549.)
- [17] SHA Lijuan, DAI Xuefeng, ZHAO Xiaoyu. Research on coordination search control of multi-robot based on discrete event systems [J]. *Journal of Qiqihar University*, 2012, 28(5): 1 – 5.
(沙丽娟, 戴学丰, 赵肖宇. 基于离散事件系统的多机器人协调搜索控制研究 [J]. 齐齐哈尔大学学报, 2012, 28(5): 1 – 5.)
- [18] WANG Fei, JIN Fujiang, LUO Jiliang. Deadlock-free decentralized supervisory control of discrete event systems [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2012, 52(9): 1182 – 1187.
(王飞, 金福江, 罗继亮. 离散事件系统的无死锁分散监控 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 52(9): 1182 – 1187.)

⁵true / false = isomorph(DES1, DES2)用于判断自动机DES1与DES2是否同构, 即是否可以通过对其中一个自动机的状态进行恰当的重新编号使得两自动机具有完全相同的结构. 如果程序返回true, 则两自动机同构; 否则不同构^[6].

- [19] LIU Jiufu, LIU Wenliang, ZHOU Jianyong, et al. An improved design of online fault diagnosis for partially observed Petri net systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(7): 866 – 872.
(刘久富, 刘文良, 周建勇, 等. 改进的部分可观Petri网系统在线故障诊断器设计 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(7): 866 – 872.)
- [20] YE Dandan, LUO Jiliang. Application of structural information of partially observed Petri net in fault diagnosis [J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(3): 366 – 373.
(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.)
- [21] SUN Yan, WU Shuyan, LIU Jiufu, et al. Research on fault diagnosis of high-speed rail in and out of station control system with Petri nets [J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2016, 41(2): 535 – 540.
(孙燕, 武书彦, 刘久富, 等. 高铁进出站控制系统的Petri网故障诊断研究 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(2): 535 – 540.)
- [22] FANG Huan, LU Yang, FANG Xianwen, et al. Research on fault diagnosis method of locomotives dispatching based on partially observed Petri net [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(5): 722 – 729.
(方欢, 陆阳, 方贤文, 等. 基于部分可观Petri网的机车故障诊断方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 722 – 729.)
- [23] CHEN Guanzhong, CHEN Qingxin, MAO Ning, et al. Simulation optimization of AGV and buffer capacity in intelligent manufacturing system [J]. *Industrial Engineering Journal*, 2016, 19(3): 77 – 84.
(陈冠中, 陈庆新, 毛宁, 等. 智能制造系统AGV小车及缓冲区容量仿真优化 [J]. 工业工程, 2016, 19(3): 77 – 84.)
- [24] CAO Zhenxin, E Shiju, JIAO Weidong, et al. Optimization of buffer capacity for mixed model assembly line based on Markov chain [J]. *New Technology & New Process*, 2015, (6): 29 – 33.
(曹振新, 鄂世举, 焦卫东, 等. 基于马尔科夫链的混流装配线缓冲区配置优化研究 [J]. 新技术新工艺, 2015, (6): 29 – 33.)
- [25] GARCIA-HERREROS P, SHARDA B, AGARWAL A, et al. Empirical study of the behavior of capacitated production-inventory systems [C] // *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 2251 – 2260.
- [26] YI Shuping, PU Ji, GAO Qingxuan, et al. Modeling of work-in-process buffer for group production unit based on timed Petri net [J]. *Industrial Engineering and Management*, 2009, 14(6): 7 – 11.
(易树平, 蒲骥, 高庆萱, 等. 基于赋时Petri网的成组生成单元缓冲区建模 [J]. 工业工程与管理, 2009, 14(6): 7 – 11.)
- [27] BHERER H, DESHARNAIS J, ST-DENIS R. Control of parameterized discrete event systems [J]. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2009, 19(2): 213 – 265.
- [28] GRIGOROV L, BUTLER B E, CURY J E R, et al. Conceptual design of discrete-event systems using templates [J]. *Discrete Event Dynamic Systems*, 2011, 21(2): 257 – 303.
- [29] GRIGOROV L, CURY J E R, RUDIE K. Design of discrete-event systems using templates [C] // *Proceedings of the American Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 499 – 504.
- [30] ZHANG Renyuan, GAN Yongmei, CHAO Wujie, et al. Improved algorithm of quasi-congruence in discrete event system [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(2): 151 – 156.
(张仁远, 甘永梅, 晁武杰, 等. 离散事件系统拟同余关系的改进算法 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(2): 151 – 156.)
- [31] WONHAM W M. *Design Software: TCT* [EB/OL]. Systems Control Group, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, 2016. [2016-07-01]. <http://www.control.toronto.edu/DES>.
- [32] RABIN M O, SCOTT D. Finite automata and their decision problems [J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1959, 3(2): 114 – 125.

作者简介:

焦亭 (1988–), 男, 博士研究生, 目前研究方向为离散事件系统监督控制理论, E-mail: jiaoting2012@gmail.com;

甘永梅 (1971–), 女, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为离散事件系统监督控制理论, E-mail: ymgan@mail.xjtu.edu.cn;

肖国春 (1965–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: xgc@mail.xjtu.edu.cn;

WONHAM W M (1934–), 男, 加拿大多伦多大学终身荣誉教授, 离散事件系统监督控制理论创始人, 目前研究方向为离散事件系统监督控制理论、赋时状态树结构、状态树结构可观测性等, E-mail: wonham@control.utoronto.ca.