

DOI: 10.7652/xjtub201304015

实时状态树结构模型的最优非阻塞模块化监督控制研究

晁武杰¹, 甘永梅¹, 王兆安¹, W. M. WONHAM²

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

摘要: 针对传统的实时离散事件系统监督控制方法中存在监控器的设计复杂度高、结构不灵活且不易维护的问题,在实时状态树结构模型的基础上,提出了一种实时离散事件系统的最优非阻塞模块化监督控制方法。该方法根据不同的控制任务,将被控系统的性能指标划分为若干个子性能指标的合取形式,并且对每一个子性能指标分别设计子最优非阻塞监督控制器。由这些子最优非阻塞监督控制器构造被控系统的模块化监督控制器,给出了最优非阻塞模块化监督控制器的存在条件;通过设计协调器来解决整个闭环系统可能阻塞的问题。实验结果表明,模块化监督控制方法不但可以有效地降低实时离散事件系统监督控制器的设计复杂度,而且保证所得到的模块化监督控制器是最优且非阻塞的。

关键词: 实时离散事件系统;实时状态树结构;模块化监督控制;最优;非阻塞;谓词;协调器

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)04-0086-06

An Optimal Nonblocking Modular Supervisory Control to Real-Time State Tree Structures

CHAO Wujie¹, GAN Yongmei¹, WANG Zhao'an¹, W. M. WONHAM²

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

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

Abstract: An optimal nonblocking modular supervisory control of timed discrete-event systems based on real-time state-tree-structures is proposed to alleviate the problem that the complexity of supervisor synthesis is very high and the supervisor is inflexible and hard to maintain in the traditional supervisory control of timed discrete-event systems. The timed discrete-event system is modeled as a real-time state-tree-structure and the specification of the controlled system is given as a predicate to indicate the legal states of the controlled systems. The total specification is divided into several sub-specification according to different control tasks, and an optimal nonblocking supervisor is synthesized for each sub-specification. A modular supervisor is constructed based on these sub-supervisors. Conditions for the optimal and nonblocking modular supervisor to exist are given. A coordinator is designed to solve the blocking problem of the closed-loop system. The results from both theoretical analysis and experiments show that the proposed modular supervisory control approach effectively reduces the complexity of synthesis of supervisor in timed discrete-event systems and the optimization and nonblocking of the modular supervisor are guaranteed.

Keywords: timed discrete-event system; timed state tree structure; modular supervisory control; optimal; nonblocking; predicate; coordinator

收稿日期: 2012-08-15。 作者简介: 晁武杰(1983—),男,博士生;甘永梅(通信作者),女,副教授。 基金项目: 国家教育部建设高水平大学公派留学生项目([2010]3006)。

网络出版时间: 2013-02-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130219.1010.005.html>

实时离散事件系统是离散事件系统的一个重要研究方向^[1-2]。文献[3]在有限状态自动机模型的基础上,提出了实时离散事件系统的监督控制理论。文献[4]提出了基于该理论的一种状态反馈控制方法。但是,该理论在综合系统最优非阻塞监督控制器时会遇到系统状态“爆炸式”增长的问题^[5]。为了处理系统状态“爆炸式”增长的问题,文献[6]在文献[7-8]的基础上,提出了实时状态树结构模型,该模型是自动机模型的一种改进,对系统模型进行了分层结构化处理,但是文献[6]只进行了单一集中控制的研究,不能满足日益发展的功能复杂和布局分散的离散事件系统的需要,例如柔性制造系统和多智能体系统。

相对于单一集中控制,模块化监督控制方法结构更灵活,更有利于系统维护,当更改或添加系统性能指标时,只需要更改或添加相应的模块化监督控制器即可,可以保持系统中的其他部件和设计不变^[9-11]。在算法复杂度上,模块化监督控制器的设计算法要优于单一集中监督控制器的设计算法,因此模块化监督控制方法更适合柔性制造系统和多智能体系统。

本文在实时状态树结构模型的基础上,提出了实时离散事件系统的模块化监督控制方法。将系统总的性能指标,按照不同的控制任务划分为若干个子性能指标的合取;对每一个子性能指标,利用现有方法分别设计最优非阻塞监督控制器,称为子最优非阻塞监督控制器;然后,根据这些子最优非阻塞监督控制器,构造被控系统的模块化监督控制器。本文给出了该模块化监督控制器为最优非阻塞模块化监督控制器的条件。当该条件不能被满足,即在模块化监督控制下,闭环系统阻塞时,本文引入协调器^[10,12-13]来解决系统阻塞问题,以确保最终闭环系统的运行特征是最优且非阻塞的。本文给出了协调器的设计方法。理论分析和实验验证的结果表明,本文中所设计的模块化监督控制器是最优且非阻塞的。

1 基础知识

1.1 实时状态树结构模型

实时离散事件系统的实时状态树结构模型是一个6元组 $G=(S_t, H, \Sigma, \Delta, S_{i0}, S_{tm})$ ^[6]。其中: S_t 称为状态树,是被控系统所有状态的集合; S_t 的每个子集都称为子状态树,用 $S(S_t)$ 表示 S_t 中所有子状态树的集合; S_t 中的每个元素称为状态,用 $B(S_t)$ 表

示 S_t 中所有状态的集合。 H 是被控系统中表示每个组件的实时 holon(有限状态自动机模型)的集合,每个实时 holon 即为相对应组件的实时系统模型,即实时工作过程,因此实时离散事件系统的时间特性是在实时 holon 中得到反映的。 Σ 是被控系统中所有事件的集合 $\Sigma=\Sigma_{act} \cup \{\text{tick}\}$,其中 Σ_{act} 是所有非 tick 事件的集合。对于 Σ_{act} 中的任意事件 σ ,其发生都有一个时间下界 l_σ 和时间上界 u_σ 。因此, Σ_{act} 中的事件都可以表示为3元组 $(\sigma, l_\sigma, u_\sigma)$,称为实时事件。根据时间上界的不同, Σ_{act} 中有两种事件:prospective 事件,其时间上下界为 $0 \leq l_\sigma \leq u_\sigma < \infty$;remote 事件,其时间上下界为 $0 \leq l_\sigma < u_\sigma = \infty$ 。在监督控制理论中,remote 事件为可控事件,prospective 事件为不可控事件^[2]。因此, $\Sigma=\Sigma_c \cup \Sigma_u \cup \{\text{tick}\}$,其中 Σ_c 为可控事件集合, Σ_u 为不可控事件集合;在实时离散事件系统中还引入强制事件 $\Sigma_{for} \subset \Sigma_c \cup \Sigma_u$,强制事件可以优先于时钟 tick 发生,即如果在一个状态下,有强制事件能够发生,那么时钟 tick 就不能发生。 $\Delta: S(S_t) \times \Sigma^* \rightarrow S(S_t)$ 是全局状态转移函数,其中 Σ^* 表示由 Σ 中事件所组成的所有有限长度事件串的集合。 $S_{i0} \in S(S_t)$ 表示初始状态, $S_{tm} \subset S(S_t)$ 表示标识状态集合。

图1是一个实时状态树结构模型的例子,其相应的状态树如图2所示。在该例子中,M1和M2代表两个实时 holon;可控事件集合 $\Sigma_c=\{11, 21\}$,不可控事件集合 $\Sigma_u=\{10, 20\}$,事件的时间上下界分别为 $(10, 0, 0), (11, 0, \infty), (20, 0, 0), (21, 0, \infty)$;tick 是时钟;该例子中初始状态和标识状态均为 $\{M1.0, M2.0\}$; $\Delta(M1.0, 11)=M1.1$ 为其中一个状态转移函数。

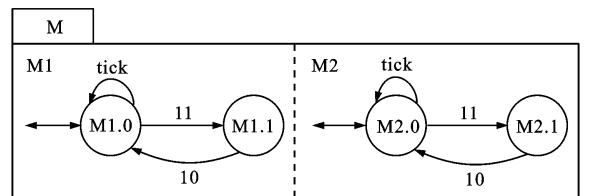


图1 实时状态树结构模型例子

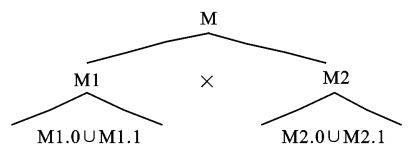


图2 图1中例子所对应的状态树

1.2 谓词

谓词 P 是一个映射: $B(S_t) \rightarrow \{0, 1\}$, 其中 0 表示逻辑假; 1 表示逻辑真。对于任意一个状态 $b \in B(S_t)$, 如果 $P(b) = 1$, 就说状态 b 满足谓词 P , 记为 $b \models P$ 。 $B(S_t)$ 上的所有谓词集合记为 $P(S_t)$ 。对于任意一个状态 $b \in B(S_t)$, 如果在状态 b 下没有强制事件能够发生, 就说状态 b 是非强制状态; 用谓词 F 表示所有非强制状态, 称谓词 F 为非强制谓词。实时状态树结构模型的谓词表示形式为 $G = (S_t, H, \Sigma, \Delta, P_0, P_m)^{[6]}$ 。其中, S_t 、 H 和 Σ 如前所述; $\Delta: P(S_t) \times \Sigma^* \rightarrow P(S_t)$ 是全局状态转移函数的谓词表示形式; P_0 和 P_m 分别是 S_{t0} 和 S_{tm} 的谓词表示形式。 $R(G, P)$ 表示可达谓词, $C_r(G, P)$ 表示逆可达谓词。如果 $P \leq R(G, P)$, 则说谓词 P 是可达的; 如果 $P \leq C_r(G, P)$, 则说谓词 P 是逆可达的; 如果谓词 P 既是可达又是逆可达的, 则说 P 是非阻塞的。对于被控系统 G , 如果 $R(G, \text{true}) \leq C_r(G, \text{true})$, 则说 G 是非阻塞的。对于被控系统 $G = (S_t, H, \Sigma, \Delta, P_0, P_m)$ 和性能指标 $P \in P(S_t)$, 如果 $(\forall \sigma \in \Sigma_u) P \leq M_\sigma(P)$ 并且 $(P \wedge F) \leq M_{\text{tick}}(P)$, 就说 P 对于 G 是弱可控的, 简称可控, 其中 $M(P)$ 是最弱充分前提^[6]。 $C(P)$ 表示 P 中可控子谓词的集合, $\text{sup}C(P)$ 为该集合中的极大元。 $C_c(P)$ 表示 P 中既可控又非阻塞的子谓词的集合, $\text{sup}C_c(P)$ 为该集合中的极大元。

1.3 实时状态树结构模型的系统控制

实时状态树结构模型的系统控制就是通过设计状态反馈控制器, 使闭环系统的运行特征能够满足被控系统性能指标的要求。定义 $f: B(S_t) \rightarrow \Sigma$ 为被控系统 G 的状态反馈控制器, 其中

$$(\forall b \in B(S_t))$$

$$f(b) \supseteq \begin{cases} \Sigma_u, & \text{如果 } F(b) = 0 \\ \Sigma_u \cup \{\text{tick}\}, & \text{如果 } F(b) = 1 \end{cases}$$

如果 $\sigma \in f(b)$, 则事件 σ 在状态 b 下能够被使能。实际应用中, 状态反馈控制器 f 利用谓词集合 $\{f_\sigma | \sigma \in \Sigma\}$ 来表示, 其中, $f_\sigma: B(S_t) \rightarrow \{0, 1\}$ 是事件 σ 的控制函数, $f_\sigma(b) = 1$ 当且仅当 $\sigma \in f(b)$ 。利用 $G^f = (S_t, H, \Sigma, \Delta^f, P_0^f, P_m)$ 表示被控系统 G 在状态反馈控制器 f 作用下的闭环系统, 其中 Δ^f 为闭环状态转移函数, P_0^f 为闭环系统初始状态。对于被控系统 $G = (S_t, H, \Sigma, \Delta, P_0, P_m)$ 和性能指标 $P \in P(S_t)$, 如果 $R(G^f, \text{true}) = R(G, \text{sup}C(P))$, 则说状态反馈控制器 f 是最优的; 如果 $R(G^f, \text{true}) = R(G, \text{sup}C_c(P))$, 则说 f 是最优且非阻塞的。

2 实时状态树结构模型的模块化监督控制方法

2.1 问题的提出

对于被控系统 $G = (S_t, H, \Sigma, \Delta, P_0, P_m)$ 和性能指标 $P \in P(S_t)$, $P \wedge P_0 \neq \text{false}$ 。假设 P 可以表示为谓词的合取形式 $P = \bigwedge_{i=1}^n P_i$, 即 P 为总的性能指标, $P_i \in P(S_t)$ 为子性能指标。 f_i 为 P_i 的最优非阻塞状态反馈控制器, 即 $R(G^{f_i}, \text{true}) = R(G, \text{sup}C_c(P_i))$, 则有如下定义。

定义 1 模块化状态反馈控制器 f 的控制函数定义为

$$f_\sigma := \bigwedge_{i=1}^n f_{i,\sigma}, \quad \sigma \in \Sigma \quad (1)$$

即

$$f_\sigma(b) = \begin{cases} 1, & (\forall i \in (1, \dots, n)) f_{i,\sigma}(b) = 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

定义 2 模块化状态反馈控制器为

$$f := \bigwedge_{i=1}^n f_i = \{f_\sigma | \sigma \in \Sigma\} \quad (3)$$

式中: f_σ 由定义 1 给出。

实时状态树结构模型的模块化监督控制问题是对于被控系统 $G = (S_t, H, \Sigma, \Delta, P_0, P_m)$ 和性能指标 $P \in P(S_t)$, $P \wedge P_0 \neq \text{false}$ 。假设 P 可以表示为谓词的合取形式 $P = \bigwedge_{i=1}^n P_i$, 则是否存在由定义 2 定义的模块化状态反馈控制器 f 且使闭环系统行为最优且非阻塞, 即 $R(G^f, \text{true}) = R(G, \text{sup}C_c(P))$ 。

2.2 $[\cdot]$ 函数及其性质

$[\cdot]$ 函数在计算被控系统控制器中起着重要的作用, 本节给出 $[\cdot]$ 函数及其性质。

定义 3^[6] 对于被控系统 $G = (S_t, H, \Sigma, \Delta, P_0, P_m)$ 和谓词 $P \in P(S_t)$, 谓词转移函数 $[\cdot]: P \rightarrow [P]$ 定义为 $\forall b, b' \in B(S_t)$

- (1) $b \models P \Rightarrow b \models [P]$;
- (2) $b \models [P] \ \& \ b \neq \emptyset \ \& \ \sigma \in \Sigma_u \ \& \ \Delta(b', \sigma) = b \Rightarrow b' \models [P]$;
- (3) $b \models [P] \ \& \ b \neq \emptyset \ \& \ b' \models F \ \& \ \Delta(b', \text{tick}) = b \Rightarrow b' \models [P]$;
- (4) 没有其他状态 b 满足 $[P]$ 。

定理 1^[6] 假设 $P_1, P_2 \in P(S_t)$ 是两个谓词, 则 $[P_1] \vee [P_2] = [P_1 \vee P_2]$ 。

定理 2^[6] $\text{sup}C(P) = \neg[\neg P]$ 。

2.3 最优模块化监督控制方法

定理 3 对于被控系统 $G = (S_t, H, \Sigma, \Delta, P_0, P_m)$ 和

性能指标 $P_1, P_2 \in P(S_t)$, 假设 f_1 和 f_2 分别为 P_1 和 P_2 的状态反馈控制器, 则以下命题成立

$$R(G^{f_1 \wedge f_2}, \text{true}) = R(G, R(G^{f_1}, \text{true}) \wedge R(G^{f_2}, \text{true}))$$

证明略。

注1 当性能指标和状态反馈控制器大于2时, 该命题依然成立, 即对于 $P_i \in P(S_t) (i = (1, \dots, n))$, f_i 是 P_i 的状态反馈控制器, 则 $R(G^{\wedge_{i=1}^n f_i}, \text{true}) = R(G, \wedge_{i=1}^n R(G^{f_i}, \text{true}))$ 。

定义4 $E_G(b)$ 是一个事件的集合, 该集合表示被控系统 G 在状态 $b \in B(S_t)$ 下有定义的事件, 即

$$E_G(b) := \{\sigma \in \Sigma \mid \exists b' \in B(S_t) \& \Delta(b, \sigma) = b'\}$$

定义5 $E_P(b)$ 是一个事件的集合, 该集合表示谓词 P 在状态 $b \models P$ 下有定义的事件, 即

$$E_P(b) := \{\sigma \in \Sigma \mid \exists b' \models P \& \Delta(b, \sigma) = b'\}$$

定义6 对于给定的被控系统 $G = (S_t, H, \Sigma, \Delta, P_0, P_m)$ 和谓词 $P \in P(S_t)$, $P \neq \text{false}$ 。我们说 P 相对于 G 具有强制性, 如果 $(\forall b \models P) \text{tick} \in E_G(b) - E_P(b) \Rightarrow E_P(b) \cap \Sigma_{\text{for}} \neq \emptyset$, 也就是说, $(\forall b \models P)$

$$E_P(b) \cap \Sigma_{\text{for}} = \emptyset \& \text{tick} \in E_G(b) \Rightarrow \text{tick} \in E_P(b)$$

定义7 对于给定的被控系统 $G = (S_t, H, \Sigma, \Delta, P_0, P_m)$ 和谓词 $P_1, P_2 \in P(S_t)$, $P_1, P_2 \neq \text{false}$ 。我们说 P_1 和 P_2 相对于 G 具有联合强制性, 如果谓词 $P_1 \wedge P_2$ 相对于 G 具有强制性。

定理4 对于被控系统 $G = (S_t, H, \Sigma, \Delta, P_0, P_m)$ 和性能指标 $P \in P(S_t)$, $P \wedge P_0 \neq \text{false}$ 。假设 $P = \wedge_{i=1}^n P_i$, f_i 是 P_i 的最优状态反馈控制器, 则如果谓词 $\text{supC}(P_1), \dots, \text{supC}(P_n)$ 相对于 G 具有联合强制性, 那么 $f = \wedge_{i=1}^n f_i$ 为被控系统的最优模块化状态反馈控制器, 即

$$R(G^f, \text{true}) = R(G, \text{supC}(P))$$

证明略。

定理4表明, 当各个子状态反馈控制器 f_i 均为最优且各个 P_i 的最大可控子谓词关于 G 具有联合强制性时, 模块化状态反馈监控器 $f = \wedge_{i=1}^n f_i$ 为被控实时系统 G 的最优模块化状态反馈监控器。

2.4 最优非阻塞模块化监督控制方法

定义8 对于被控系统 G 和状态反馈控制器 $f_i (i = (1, \dots, n))$, 如果闭环系统 $G^{\wedge_{i=1}^n f_i}$ 是非阻塞的, 则说 $f_i (i = (1, \dots, n))$ 是非冲突的。

定理5 对于被控系统 $G = (S_t, H, \Sigma, \Delta, P_0, P_m)$ 和性能指标 $P \in P(S_t)$, $P \wedge P_0 \neq \text{false}$ 且 $P = \wedge_{i=1}^n P_i$ 。 f_i 是 P_i 的状态反馈控制器, 当满足以下3个条件时, $f = \wedge_{i=1}^n f_i$ 是被控系统的最优且非阻塞模块化

状态反馈控制器:

(1) $f_i (i = (1, \dots, n))$ 均为最优非阻塞状态反馈控制器;

(2) $f_i (i = (1, \dots, n))$ 是非冲突的;

(3) $R(G^{f_i}, \text{true}) (i = (1, \dots, n))$ 相对于 G 具有联合强制性。

证明略。

定理5表明, 当上述3个条件同时满足时, 可以根据给定的被控系统和性能指标综合出最优非阻塞模块化状态反馈控制器。但是, 在实践中, 离散事件系统的模块化监督控制经常会引起闭环系统的阻塞, 也就是说 f_i 是冲突的^[13]。目前来说, 主要通过引入协调器^[10, 12-13]来解决 f_i 冲突的问题。协调器的任务是协调各个子状态反馈控制器 f_i , 它不能使被控系统满足任何性能指标的要求。协调器由以下定义给出。

定义9 对于被控系统 $G = (S_t, H, \Sigma, \Delta, P_0, P_m)$, f 是 G 的最优非阻塞模块化状态反馈控制器, 则协调器 f_{co} 定义为

$$R((G^f)^{f_{\text{co}}}, \text{true}) = R(G^f, \text{supC}_C P(G^f, R(G^f, \text{true}))) \quad (4)$$

式中: $R(G^f, \text{true})$ 表示闭环系统中的可达谓词(状态); $\text{supC}_C P(G^f, R(G^f, \text{true}))$ 表示以闭环系统中的可达谓词作为性能指标, 以闭环系统本身作为被控系统, 然后对这一控制问题综合最优非阻塞状态反馈控制器, 其结果即为协调器 f_{co} 。

定理6 对于被控系统 $G = (S_t, H, \Sigma, \Delta, P_0, P_m)$ 和性能指标 $P \in P(S_t)$, $P \wedge P_0 \neq \text{false}$ 且 $P = \wedge_{i=1}^n P_i$ 。 f_i 是 P_i 的状态反馈控制器, 如果 $f_i (i = (1, \dots, n))$ 是冲突的, 则当以下条件满足时, $f = (\wedge_{i=1}^n f_i) \wedge f_{\text{co}}$ 是被控系统的最优且非阻塞模块化状态反馈控制器:

(1) $f_i (i = (1, \dots, n))$ 均为最优非阻塞状态反馈控制器;

(2) f_{co} 是由定义9得到的协调器;

(3) $R(G^{f_i}, \text{true}) (i = (1, \dots, n))$ 和 $R((G^f)^{f_{\text{co}}}, \text{true})$ 相对于 G 具有联合强制性。

证明略。

定理6放宽了定理5中条件(2)的要求, 使最优非阻塞模块化监督控制的适用范围更广。从定理5和定理6可知, 当满足一定条件时, 本文提出的实时状态树结构模型的模块化监督控制问题是可以解决的。

2.5 控制器设计复杂度分析

对于被控系统 $G=(S_t,H,\Sigma,\Delta,P_0,P_m)$ 和性能指标 $P\in P(S_t), P\wedge P_0\neq\text{false}$ 且 $P=\bigwedge_{i=1}^n P_i$ 。在实时状态树结构模型中,所有谓词均由二叉决策图表示,记 P_i 的二叉决策图中含有 m_i 个节点。在最坏情况下,性能指标 P 中含有 $\prod_{i=1}^n m_i$ 个节点。假设被控系统 G 中含有 Y 个状态, N 个事件,那么计算性能指标 P 的集中最优非阻塞状态反馈控制器的计算复杂度为 $O((\prod_{i=1}^n m_i)^2 Y^2 N^2)$, 计算 P 的最优非阻塞模块化状态反馈控制器的计算复杂度为 $O(\max\{m_i\}^2 Y^2 N^2)$, 其中 $\max\{m_i\}$ 表示 m_i 中的最大值。因此,计算最优非阻塞模块化状态反馈控制器的计算复杂度要优于计算集中最优非阻塞状态反馈控制器的计算复杂度。

3 实验验证

3.1 实例描述

下面通过一个实例来验证本文所提出的模块化监督控制方法。该实例中的被控系统 G 是一个简化的生产线的例子,记为 SF。系统的结构和实时状态树结构模型以及状态树分别如图 3、图 4 和图 5 所示。其中, M1 和 M2 是两个加工机械, B 是一个存储单元,并且每时刻只能存储一个工件。该实例的功能是通过 M1 和 M2 两个加工机械完成对一个工件的加工。事件描述如表 1 所示。

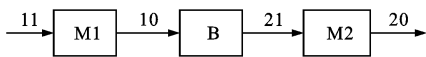


图 3 SF 的结构

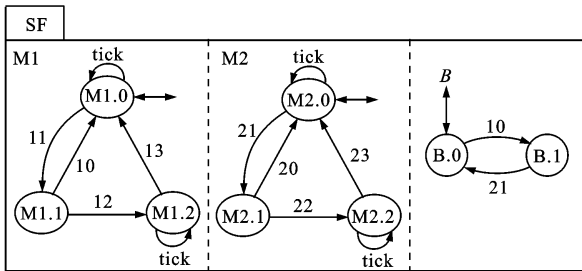


图 4 SF 的实时状态树结构模型

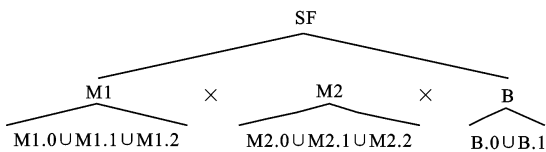


图 5 SF 的状态树

表 1 SF 的事件描述

事件	事件描述	可控 与否	强制 与否	时间 上下界
10	加工机械 1 完成 工件加工	否	否	(0,0)
11	加工机械 1 开始 工件加工	是	否	(0,∞)
12	加工机械 1 发生 损坏	否	是	(0,0)
13	加工机械 1 完成 修复	是	否	(0,∞)
20	加工机械 2 完成 工件加工	否	否	(0,0)
21	加工机械 2 开始 工件加工	是	否	(0,∞)
22	加工机械 2 发生 损坏	否	是	(0,0)
23	加工机械 2 完成 修复	是	否	(0,∞)

3.2 被控系统的性能指标

被控系统 G 的性能指标为存储单元 B 不能发生溢出,即每时刻 B 中的工件数不能多于 1 个,记为 P_1 ;当加工机械 2 发生损坏时,无论加工机械 1 是否发生损坏,都必须首先修理加工机械 2,记为 P_2 。因此,被控系统总的性能指标为 $P=P_1\wedge P_2$ 。 P_1 、 P_2 的谓词表示为 $P_1:=(B.0,21)\vee(B.1,12)$,即在状态 $B.0$ 时事件 21 不能发生,在状态 $B.1$ 时事件 12 不能发生, $P_2:=(M2.2,13)$,即在状态 $M2.2$ 时事件 13 不能发生。

3.3 结果与分析

子性能指标 P_1 和 P_2 的最优非阻塞状态反馈控制器 f_1 和 f_2 分别如图 6、图 7 所示,其中 $M2_1$ 是加工机械 M2 的元变量中的一个。

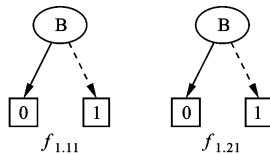


图 6 P_1 的最优非阻塞状态反馈控制器 f_1

图 6 和图 7 中分别展现了 f_1 和 f_2 中可控事件的控制函数,在图 6 和图 7 中没有出现的可控事件

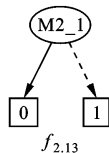


图7 P_2 的最优非阻塞状态反馈控制器 f_2

和不可控事件以及 tick 事件在被控系统的任何状态都是使能的,即都能够发生。控制函数都是以二叉决策图的形式给出,例如以 f_1 中事件 11 的控制函数 $f_{1,11}$ 为例,图 6 中虚线表示存储单元 B 在状态 B. 0,实线表示存储单元 B 在状态 B. 1;实线指向逻辑 0 表示在状态 B. 1 下,控制器要禁止事件 11 发生;虚线指向逻辑 1 表示在状态 B. 1 下,事件 11 能够发生。

通过检验,可以知道 $R(G^{f_1}, \text{true}) \wedge R(G^{f_2}, \text{true})$ 是非阻塞的,也就是说控制器 f_1 和 f_2 是非冲突的; $R(G^{f_1}, \text{true})$ 和 $R(G^{f_2}, \text{true})$ 关于 G 是联合强制的,并且 $R(G^{f_1 \wedge f_2}, \text{true}) = R(G, \sup C_C P(G, P))$,也就是说模块化状态反馈控制器 $f = f_1 \wedge f_2$ 是最优且非阻塞的。实例验证表明,本文提出的最优非阻塞模块化状态反馈控制方法是正确的。

4 结 论

本文在实时状态树结构模型的基础上,提出了实时离散事件系统的模块化状态反馈控制方法,还提出了模块化监督控制器的构造方法,给出了最优非阻塞模块化状态反馈控制器的存在条件,并且通过引入协调器,使该条件得到简化。理论分析和实例验证的结果表明:该构造方法和存在条件是正确的;该模块化监督控制方法能够降低控制器设计的算法复杂度,并且能够获得灵活的被控系统监督控制器。

参考文献:

- [1] CASSANDRAS C G, LAFORTUNE S. Introduction to discrete event systems [M]. 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 2008: 269-368.
- [2] WONHAM W M. Supervisory control of discrete-event systems [EB/OL]. (2010-07-01) [2011-08-12]. <http://www.control.utoronto.ca/~wonham/>.

- [3] BRANDIN B A, WONHAM W M. Supervisory control of timed discrete-event systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(2): 329-342.
- [4] SAADATPOOR A, WONHAM W M. State based control of timed discrete event systems using binary decision diagrams [J]. Systems and Control Letters, 2007, 56(1): 62-74.
- [5] GOHARI P, WONHAM W M. On the complexity of supervisory control design in the RW framework [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics; Part B Cybernetics, 2000, 30(5): 643-652.
- [6] SAADATPOOR A, MA C, WONHAM W M. Supervisory control of timed state tree structures [C]//Proceedings of the American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 477-482.
- [7] MA Chuan, WONHAM W M. Nonblocking supervisory control of state tree structures [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2006, 51(5): 782-793.
- [8] MA Chuan, WONHAM W M. Nonblocking supervisory control of state tree structures [M]. Berlin, Germany: Springer, 2005.
- [9] WONHAM W M, RAMADGE P J. Modular supervisory control of discrete-event systems [J]. Mathematics of Control, Signals and Systems, 1988, 1(1): 13-30.
- [10] CHAO Wujie, GAN Yongmei, WANG Zhaoan, et al. Modular supervisory control and coordination of state tree structures [J]. International Journal of Control, 2013, 86(1): 9-21.
- [11] 王飞, 胡奇英. 离散事件系统的混合分散监控 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(2): 277-280.
WANG Fei, HU Qiying. Mixed decentralized supervisory control of discrete event systems [J]. Control Theory and Applications, 2005, 22(2): 277-280.
- [12] LIN Feng, WONHAM W M. Decentralized control and coordination of discrete-event systems with partial observation [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1990, 35(12): 1330-1337.
- [13] FENG Lei, WONHAM W M. Supervisory control architecture for discrete-event systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(6): 1449-1461.

(编辑 武红江)