

基于 Petri 网的事件协调控制方法研究

方 欢 王苏城 方贤文 王丽丽
(安徽理工大学理学院 淮南 232001)

摘 要 事件的协调控制是离散事件系统中一项重要的研究内容,同时包含资源约束和事件约束的混杂约束更是系统设计的难点问题。以 DES 系统的加权 Petri 网模型为基础,以 DES 中变迁库所混杂约束的转换问题为研究对象,将事件协调约束转换为 Petri 网系统的结构约束,使得库所变迁混合约束问题转化为单一的库所约束问题。首先,提出基于 Petri 网的事件协调控制方法的设计算法,通过研究变迁约束转换为库所约束的规则与方法,将 DES 变迁库所混杂约束问题转换为单一的库所约束问题,从库所约束的角度来分析事件协调控制。其次,在 3 种不同系数约束的变迁 $\leq$ 约束表达式下,利用 Petri 网结构的特性,将变迁间的协调控制约束转换为系统的库所 $\leq$ 约束,并给出具体的算法步骤。最后,给出基于 Petri 网的事件协调控制方法的技术难点,剖析进一步分析和研究的主要问题。

关键词 协调控制, Petri 网, 变迁约束, 结构转换, 约束条件转换

中图分类号 TP301 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.11.020

Study of Events Collaborative Control Method Based on Petri Nets

FANG Huan WANG Su-cheng FANG Xian-wen WANG Li-li

(College of Science, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China)

Abstract The collaborative control method of events is an important research aspect in the area of discrete event system, while the hybrid restrictions including resource constraints and event constraints are especially difficult problems in the system construction. Based on the weighted Petri nets model of DES, and hybrid restrictions including transitions and places are taken in consideration, the event collaborative constraints are transformed into structure constraints of the corresponding Petri net model, and then the hybrid restrictions can be transformed to place restrictions. First of all, the converting method of places and transitions hybrid restriction conditions in DES was studied, and the transition collaborative control algorithms based on Petri nets have been proposed. By structure converting of Petri nets, the hybrid restriction conditions of places and transitions of DES are converted into pure places restrictions, and the goal of studying events collaborative control from the point of pure places restrictions is realized. Secondly, under three characteristic situations that behaving different coefficient restrictions in $\leq$ restriction expression, the converting rules by structure converting of Petri nets were proposed, then the transitions $\leq$ restriction conditions were converted into places restrictions, and the converting algorithms and procedures were elaborated in detail. Finally, the key difficult problems of events collaborative control were studied, and research directions and application problems for further study were discussed.

Keywords Collaborative control, Petri nets, Transition restriction, Structure converting, Restriction converting

1 引言

在基于事件驱动的工业控制系统中,各个事件之间可能存在某种约束,用约束条件来协调系统的整体有效运行。在已有的研究结论中,对于 DES 系统的约束控制问题,经典的方法是 RW 方法^[1,2]以及基于 RW 方法的活性控制器设计方法^[3-5],在柔性制造系统中得到了广泛的应用。在诸多活性控制器的设计方法中,结构分析和可达性分析是两种比较流行的技术,其中结构分析以其较高的算法效率得到了研究者的

青睐:例如,死锁预防控制器的设计^[6-12]是活性控制器的最常见的技术,即在基于结构分析的死锁预防技术中,寻找一组特殊的 Petri 网结构(称为信标),然后在此结构的基础上施加库所约束以达到阻止系统达到死锁状态的一种机制。这种机制在算法上最终都将要施加的库所约束转换成不等式约束: $\leq$ 或者 $\geq$ 的线性不等式约束条件,即 $\sum_{i=1}^n x_i * m(s_i) \leq r$ 或者 $\sum_{i=1}^n x_i * m(s_i) \geq r$,其中 x_i, r 为正整数, $m(s_i)$ 表示库所的托肯数目。

一般而言,基于事件驱动的工业控制系统中,不仅存在资源约束,而且还存在事件的协调约束。将这些事件驱动系统

到稿日期:2015-07-23 返修日期:2015-11-13 本文受国家自然科学基金项目(61070220, 61472003, 61272153, 61340003, 61402011, 61572035),安徽省教育厅高等学校自然科学研究重点项目(KJ2014A067),安徽省自然科学基金项目(1608085QF149)资助。

方 欢(1982—),女,博士,副教授,主要研究方向为 Petri 网理论与应用、智能控制, E-mail: fanghuan0307@163.com; 王苏城(1989—),男,硕士生,主要研究方向为离散事件系统性能分析。

转换为 Petri 网模型时,资源一般被刻画成库所,而事件一般被刻画为变迁,这样,资源约束和事件约束的混杂约束就转换成库所变迁混杂约束。本文将工业应用 Petri 网的受控元素从单一的库所推广到一般情况,即受控元素可能是库所,也有可能是变迁,考虑不等式约束条件下变迁约束向库所约束的转换算法,通过转换就可以将库所和变迁的混合约束问题转换成单一的库所约束转换问题,从而降低问题分析的难度,拓展已有活性控制器相关结论的应用范围。

2 基本概念和记号

为了叙述简洁,将加权 Petri 网及系统的相关记号进行整理说明。

定义 1(加权 Petri 网) 一个加权 Petri 网是一个四元组 $N=(S,T;F,W)$,其中 S,T 是有限非空且不相交的集合, S 称为库所集合, T 称为变迁集合, $F\subseteq(S\times T)\cup(T\times S)$ 称为流关系,代表从库所指向变迁或者变迁指向库所的有向弧, $W:(S\times T)\cup(T\times S)\rightarrow\mathbb{N}$ ($\mathbb{N}=\{0,1,2,\dots\}$)。

定义 2(系统标识) Petri 网 N 的标识为 $M,M:S\rightarrow\mathbb{N}$ ($\mathbb{N}=\{0,1,2,\dots\}$), $M(s)$ 表示库所 S 中托肯的数目。库所 s 被标识当且仅当 $M(s)>0$ 。一般地,若一个库所集合 $D\subseteq S$ 称为被标记当且仅当至少存在一个库所 $d\in D:M(d)>0$ 。 D 中所有库所的托肯和记为 $M(D)$, $M(D)=\sum_{s\in D}M(s)\cdot s$ 。一个库所 s 被称为未被标识当且仅当 $M(s)=0$,一个库所集合 D 称为未被标识当且仅当 $M(D)=0$ 。

一个加权 Petri 网系统 (N,M) 的变迁引发条件、变迁引发规则等内容与文献[13]中的相同,在此不作赘述。

定义 3(混杂约束:库所变迁混合不等式约束条件) 库所变迁混合线性约束问题可形式化为 $C=\sum_{s_r\in S_C}L_r\cdot m(s_r)+\sum_{t_r\in T_C}\lambda_r\cdot q(t_r)\leq b$ (或 $C=L_r\cdot m(s_r)+\lambda_r\cdot q(t_r)\geq b$),其中 L_r,λ_r,b 为整数; $m(s_r)$ 为监控库所 s_r 的托肯数目; $q(t_r)$ 为变迁 t_r 的引发次数; S_C,T_C 分别为约束库所集合和约束变迁集合。

在本文的讨论中,仅考虑 $\leq$ 不等式约束条件 $C=\sum_{s_r\in S_C}L_r\cdot m(s_r)+\sum_{t_r\in T_C}\lambda_r\cdot q(t_r)\leq b$ 。

在定义 3 中令 $T_C=\emptyset$,则得到单一库所不等式约束条件 $C_1=\sum_{s_r\in S_C}L_r\cdot m(s_r)\leq b$;令 $S_C=\emptyset$,则可以得到单一变迁不等式约束条件 $C_2=\sum_{t_r\in T_C}\lambda_r\cdot q(t_r)\leq b$ 。

本文研究 Petri 网结构的等价变换方法,考虑如何将库所变迁混合不等式约束条件转换为单一的库所不等式约束条件。转换为单一库所不等式约束条件后,就可以利用已有的活性控制器设计的相关结论对 Petri 网结构进行控制器设计。

3 变迁协调控制器方法研究

3.1 变迁约束转换为库所约束的结构变换方法

若要求变迁组 $t_1,t_2,\dots,t_q$ 满足约束条件 $\sum_{i=1}^q y_i \cdot P(t_i) \leq \omega$ 或者 $\sum_{i=1}^q y_i \cdot P(t_i) \geq \omega$ (其中 y_i,ω 为正整数, $P(t_i)$ 表示变迁 t_i 的引发次数),则可以通过添加库所的方法将受控变迁集 $t_1,$

$t_2,\dots,t_q$ 的约束转换为受控库所集 $\{s_1,s_2,\dots,s_p\}$ 的约束控制问题。

首先考虑两个变迁之间的约束关系。

设有两个变迁分别记为 t_1,t_2 ,对应的约束条件为式(1),其中 y_i,ω 为整数, $P(t_i)$ 表示变迁 t_i 的引发次数。

$$\sum_{i=1}^2 y_i \cdot P(t_i) \leq \omega \quad (1)$$

$$(1) y_1 = y_2 \text{ 且 } y_1 \cdot y_2 > 0$$

在这种条件下,通过等价的数学转换,式(1)变为 $P(t_1)+P(t_2) \leq \omega_1$ 或者 $P(t_1)+P(t_2) \geq \omega_1$,前者对应 $y_1 > 0$ 而后者对应 $y_1 < 0$,在此先考虑“小于等于不等式”,“大于等于不等式”将在后面统一进行研究。

因此,当 $y_1 = y_2$ 且 $y_1 \cdot y_2 > 0$,变迁约束为 $P(t_1)+P(t_2) \leq \omega_1$,可以通过算法 1 将变迁约束转变为库所约束。

算法 1 两变迁同系数 $\leq$ 约束转换算法

输入:Petri 网系统 $N=(S,T;F,W,M)$,变迁 t_1,t_2 对应的“ $\leq$ 不等式约束”: $P(t_1)+P(t_2) \leq \omega_1$

输出:库所约束条件,改造后的 Petri 网系统 $N'=(S',T';F',W',M')$

步骤:
Step1 增加一个控制库所 s_c ,满足条件 $s_c^*=\{t_1,t_2\}$,且 $W(s_c,t_1)=W(s_c,t_2)=1$ 。
Step2 初始化的 s_c 标识,设置 $M'(s_c)=\omega_1$ 。
Step3 令 $S'=S\cup\{s_c\}$, $T'=T$, $F'=F\cup\{(s_c,t_1),(s_c,t_2)\}$, $W'=W\cup\{W(s_c,t_1)=W(s_c,t_2)=1\}$, $M'=M+\omega\cdot s_c$ 。
Step4 返回 $N'=(S',T';F',W',M')$ 和库所约束条件 $m(s_c) \leq \omega_1$ 。

算法 1 的正确性是显然的,证明省略。

算法 1 适用于两个变迁组的情形,并且可以推广至 q ($q\geq 1$) 多个变迁 $P(t_1)+P(t_2)+\dots+P(t_q) \leq \omega_1$ 的情形,图 1 给出了通过增加控制库所 s_c ,将变迁约束 $P(t_1)+P(t_2)+\dots+P(t_q) \leq \omega_1$ 转变为库所约束 $M(s_c) \leq \omega_1$ 。

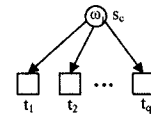


图 1 多变迁同系数约束转换方法

$$(2) y_1 \neq y_2 \text{ 且 } y_1 \cdot y_2 > 0$$

仍然只考虑“ $\leq$ 不等式约束”,约束 $\sum_{i=1}^2 y_i \cdot P(t_i) \leq \omega$ 通过算法 2 将变迁约束转变为库所约束。

算法 2 两变迁异系数 $\leq$ 约束转换算法

输入:Petri 网系统 $N=(S,T;F,W,M)$,变迁 t_1,t_2 对应的“ $\leq$ 不等式约束”: $y_1 \cdot P(t_1)+y_2 \cdot P(t_2) \leq \omega_1$

输出:库所约束条件,改造后的 Petri 网系统 $N'=(S',T';F',W',M')$

步骤:
Step1 增加一个控制库所 s_c ,满足条件 $s_c^*=\{t_1,t_2\}$,且 $W(s_c,t_1)=y_1, W(s_c,t_2)=y_2$ 。
Step2 初始化 s_c 的标识,设置 $M'(s_c)=\omega_1$ 。
Step3 令 $S'=S\cup\{s_c\}$, $T'=T$, $F'=F\cup\{(s_c,t_1),(s_c,t_2)\}$, $W'=W\cup\{W(s_c,t_1)=y_1, W(s_c,t_2)=y_2\}$, $M'=M+\omega_1\cdot s_c$ 。
Step4 返回 $N'=(S',T';F',W',M')$ 和库所约束条件 $m(s_c) \leq \omega_1$ 。

算法 2 也可以推广至 q ($q\geq 1$) 多个变迁 $y_1 \cdot P(t_1)+y_2 \cdot P(t_2)+\dots+y_q \cdot P(t_q) \leq \omega_1$ 的情形,图 2 给出了通过增

加控制库所 s_c , 将变迁约束 $\sum_{i=1}^q y_i * P(t_i) \leq \omega_1$ 转变为库所约束 $M(s_c) \leq \omega_1$ 。

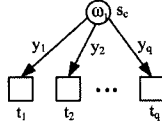


图2 多变迁异系数约束转换方法

(3) $y_1 = -y_2$

这里仍然只考虑“ $\leq$ 不等式约束”。在 $y_1 = -y_2$ 条件下, 通过等价的数学转换, 式(1)变为 $P(t_1) - P(t_2) \leq \omega_1$ 。

通过算法3将变迁 $\leq$ 约束转变为库所约束。

算法3 两变迁相反系数约束转换算法

输入: Petri网系统 $N = (S, T; F, W, M)$, 变迁 t_1, t_2 对应的“ $\leq$ 不等式约束”: $P(t_1) - P(t_2) \leq \omega_1$

输出: 库所约束条件, 改造后的 Petri网系统 $N' = (S', T'; F', W', M')$

步骤:

Step1 增加2个控制库所 s_{c1}, s_{c2} , 满足条件 $s_{c1}^+ = \{t_2\} \wedge s_{c2}^+ = \{t_1\} \wedge s_{c1}^- = \{t_1\} \wedge s_{c2}^- = \{t_2\}$, 且 $W(s_{c1}, t_2) = W(s_{c2}, t_1) = W(t_1, s_{c1}) = W(t_2, s_{c2}) = 1$ 。

Step2 初始化 s_{c1}, s_{c2} 的标识, 设置 $M'(s_{c1}) = M'(s_{c2}) = \omega_1$ 。

Step3 令 $S' = S \cup \{s_{c1}, s_{c2}\}$, $T' = T$, $F' = F \cup \{(s_{c1}, t_2), (s_{c2}, t_1), (t_1, s_{c1}), (t_2, s_{c2})\}$, $W' = W \cup \{W(s_{c1}, t_2) = W(s_{c2}, t_1) = W(t_1, s_{c1}) = W(t_2, s_{c2}) = 1\}$, $M' = M + \omega_1 \cdot s_{c1} + \omega_1 \cdot s_{c2}$ 。

Step4 返回 $N' = (S', T'; F', W', M')$, 没有库所约束条件。

算法3的思想可以通过图3进行阐释。

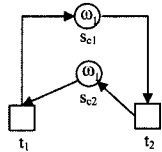


图3 两变迁相反系数情形下增加的控制模块

通过图3的网络结构, 以及算法3的变迁引发语义可知: 图3中的控制结构不仅可以实现 $P(t_1) - P(t_2) \leq \omega_1$, 还可以实现 $P(t_2) - P(t_1) \leq \omega_1$, 即实现了 $|P(t_1) - P(t_2)| \leq \omega_1$ 。由于变迁引发次数减法大部分都应用于两变迁引发次数公平性控制的环境, 即在变迁 $t_1(t_2)$ 不发生的情况下, 变迁 $t_2(t_1)$ 最多发生 ω_1 次, 即 $|P(t_1) - P(t_2)| \leq \omega_1$ 。

从 Petri网同步距离的角度可以对算法3的正确性进行证明。

定理1 算法3的控制结构可以实现 $P(t_1) - P(t_2) \leq \omega_1$ 的约束控制。

证明: 若两个变迁 t_1, t_2 的引发次数 $P(t_1), P(t_2)$ 满足不等式约束 $|P(t_1) - P(t_2)| \leq \omega_1$, 则根据同步距离的定义^[14]可知, 变迁 t_1, t_2 之间的同步距离为 $sd(t_1, t_2) = \omega_1$ 。而约束条件 $P(t_1) - P(t_2) \leq \omega_1$ 是 $sd(t_1, t_2) = \omega_1$ 的一个方面, 因此满足 $sd(t_1, t_2) = \omega_1$ 的设计结构也一定符合 $P(t_1) - P(t_2) \leq \omega_1$ 的设计约束。

文献^[14]已经证明: 在混杂 Petri网中, 图3的控制结构可以满足设计, 使得两个变迁 t_1, t_2 的同步距离为 $sd(t_1, t_2) = \omega_1 < \infty$ 。同时文献^[14]也证明了离散事件 Petri网系统是混杂 Petri网系统的特例, 因此图3的设计结构同样也可以应用

于离散事件 Petri网系统中。

由此命题得证, 证毕。

(4) $|y_1| \neq |y_2|$ 且 $y_1, y_2 < 0$

与算法3类似, 下面给出 $y_1 * P(t_1) - y_2 * P(t_2) \leq \omega_1$ 的变迁约束转换方法(见算法4), 控制模块结构图如图4所示。

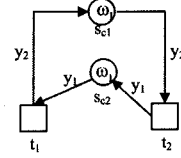


图4 变迁次数“减法”一般权重设置下的控制模块

算法4 两变迁发生次数减法 $\leq$ 约束转换算法

输入: Petri网系统 $N = (S, T; F, W, M)$ 变迁 t_1, t_2 对应的“小于等于不等式约束” $y_1 * P(t_1) - y_2 * P(t_2) \leq \omega_1$

输出: 库所约束条件, 改造后的 Petri网系统 $N' = (S', T'; F', W', M')$

步骤:

Step1 增加2个控制库所 s_{c1}, s_{c2} , 满足条件 $s_{c1}^+ = \{t_2\} \wedge s_{c2}^+ = \{t_1\} \wedge s_{c1}^- = \{t_2\} \wedge s_{c2}^- = \{t_1\}$, 且 $W(s_{c1}, t_2) = W(t_2, s_{c1}) = y_2$, $W(s_{c2}, t_1) = W(t_1, s_{c2}) = y_1$ 。

Step2 初始化 s_{c1}, s_{c2} 的标识, 设置 $M'(s_{c1}) = M'(s_{c2}) = \omega_1$ 。

Step3 令 $S' = S \cup \{s_{c1}, s_{c2}\}$, $T' = T$, $F' = F \cup \{(s_{c1}, t_2), (s_{c2}, t_1), (t_1, s_{c2}), (t_2, s_{c1})\}$, $W' = W \cup \{W(s_{c1}, t_2) = W(t_2, s_{c1}) = y_2, W(s_{c2}, t_1) = W(t_1, s_{c2}) = y_1\}$, $M' = M + \omega_1 \cdot s_{c1} + \omega_1 \cdot s_{c2}$ 。

Step4 返回 $N' = (S', T'; F', W', M')$, 没有库所约束条件。

3.2 变迁协调控制器设计方法

定义4 记事件驱动型被控系统 H 的 Petri网模型为 $\Sigma = (S, T; F, W, M_0)$, 需要协调控制的两个事件为 e_1, e_2 。设变迁 t_1 和 t_2 分别代表了两个事件 e_1 和 e_2 , $P(t_1)$ 和 $P(t_2)$ 分别代表了变迁 t_1 和 t_2 的发生次数, $\sum_{i=1}^2 y_i * P(t_i) \leq \omega$ 表示变迁协调控制目标。若 $\exists ((S_C \subseteq S) \vee (S_C \cap S = \emptyset))$, 增加弧 F_C ($F_C \cap F = \emptyset$), 弧相应的权重函数为 W_C , 使得 $\sum_{i=1}^2 y_i * P(t_i) \leq \omega$ 满足协调控制目标, 则称 S_C, t_1, t_2, F_C, W_C 为一组协调控制器, 记为 $Con(S_C, t_1, t_2, F_C, W_C)$ 。

可以将定义4推广至 $q(q \geq 2)$ 的情形下。

定义5 记事件驱动型被控系统 H 的 Petri网模型为 $\Sigma = (S, T; F, W, M_0)$, 需要协调控制的事件为 $e_1, e_2, \dots, e_q$ ($q \geq 2$)。设变迁 $t_1, t_2, \dots, t_q$ 分别代表了事件 $e_1, e_2, \dots, e_q$, $\sum_{i=1}^q y_i * P(t_i) \leq \omega$ 代表变迁协调控制目标。若 $\exists ((S_C \subseteq S) \vee (S_C \cap S = \emptyset))$, 增加弧 F_C ($F_C \cap F = \emptyset$), 弧相应的权重函数为 W_C , 使得 $\sum_{i=1}^q y_i * P(t_i) \leq \omega$ 满足协调控制目标, 则称 S_C, t_1, t_2, F_C, W_C 为一组同步控制器, 记为 $Con(S_C, t_1, t_2, F_C, W_C)$ 。

特别地, 当协调控制的事件数目为1时, 即相应的 $\leq$ 不等式约束条件 $y_1 * P(t_1) \leq \omega$ 。在这种情况下可以使用图2的结构约束方法来删除图2中的元素 $x: x \neq t_1$ 、弧函数及权重函数 $(s_c, y) \wedge W(s_c, y): y \neq t_1$, 即可完成单一变迁的 $\leq$ 不等式约束的结构约束变换。

下面给出系统 H 中变迁库所混杂约束的协调控制方法的一般步骤。

Step1 将系统 H 的资源约束转换为库所约束, 将事件协调约束转换

为变迁约束,列出所有的约束条件;

Step2: for 每一个 $\leq$ 约束条件 c_i

{ if c_i 中不含有变迁约束 then continue;

else

1) 选择变迁集合 $t_1, t_2, \dots, t_q (q \geq 1)$, 标注 $t_1, t_2, \dots, t_q$ 的行为协调目标, 将其在 Petri 网模型 Σ 中需要协调控制的行为转换为

$\leq$ 不等式约束条件 $\sum_{i=1}^q y_i * P(t_i) \leq \omega$;

2) 分析 $t_1, t_2, \dots, t_q$ 及其约束系数 $y_1, y_2, \dots, y_q$ 的特点, 借助图 1—图 4 给出的转换方法, 将行为约束转化为 Petri 网系统的结构约束;

3) 在系统 H 的已有 Petri 网模型中, 通过算法 1—算法 4 给出的协调控制器设计方法, 借助增加控制弧及弧标注, 或者借助增加控制库所的方法来实现设定的 $\sum_{i=1}^q y_i * P(t_i) \leq \omega$, 得到实现协调控制后的 Petri 网系统 Σ' ;

}

Step3 对 Σ' 进行仿真验证。

4 变迁约束转换为库所约束的必要性分析

通过算法 1 和算法 4, 结合 3.2 节中的变迁协调控制器设计方法, 可以实现将 DES 系统中的变迁协调控制转换为对应的库所约束。之所以要实现变迁约束向库所约束的转化, 其主要原因在于:

(1) 在 DES 系统建模中, 状态一般刻画为库所, 而行为动作刻画为变迁, 通过物联网的监控技术, 相对于实现变迁发生次数的监控, 通常实现状态的监控在技术上要简单很多, 因此, 在实际应用中多以实现状态监控的技术为主。

(2) 在已有的结论中, 针对状态的监控技术已经十分完善, 如资源约束环境下的信标控制技术^[1-12], 这些技术已经在 FMS 中取得了成功的应用。在 DES 中, 通过变迁约束转换为库所约束, 有利于实现系统约束条件的一致性, 将系统的监控视角统一为库所, 有利于系统的整体约束条件的设计, 从而将信标控制的对象延伸到变迁行为的协调上, 拓展信标控制的对象范围。

5 案例分析

以文献[15]提到的矿机机车调度控制系统为例, 来例证本文提出的变迁约束转换为库所约束的方法。

图 5 给出了某矿井底巷道运输简易图, 其中标号 1—9 表示运输区段, CH1 表示井底车场, CH2, CH3 表示采区车场。在井下机车运输系统中, 主要有两类需要考虑的问题: 1) 如何控制不同采区方向的机车发车次数, 使得整体系统运行不会因为公用资源的公用而产生死锁; 2) 如何控制不同采区方向的机车发车频率, 使得各个采区的开采工作能够协调。

通过对图 5 应用背景中的连续变量离散化^[14], 给出图 5 对应的 Petri 网模型系统, 如图 6 所示。

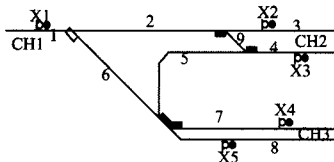


图 5 一个简易运输巷道图

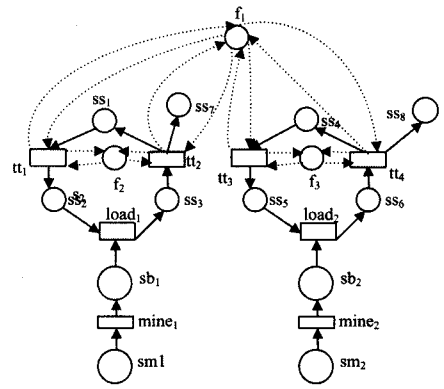


图 6 图 5 对应的调度系统加权 Petri 网模型

其中, 库所 $ss_i (i=1, 2, \dots, 8)$ 表示区段或车场缓冲区, 库所 sb_i 和 $sm_i (i=1, 2)$ 表示采区缓存和采区煤储区, 离散变迁 $tt_j (j=1, 2, 3, 4)$ 表示通过区段, 变迁 $mine_1$ 和 $mine_2$ 表示两个采区的开采动作; 库所 $f_i (i=1, 2, 3)$ 及其相关联的弧(点线)表示对公用区段的互斥使用。

使用本文提出的变迁协调控制器设计方法, 给出控制不同采区发车次数, 来达到系统无系统运行以及满足采区运输次数公平性控制的要求。

首先将两个控制目标转换为 $\leq$ 不等式约束(a)–(b):

$$\begin{cases} P(tt_1) + P(tt_3) \leq R & (a) \\ |P(tt_1) - P(tt_3)| \leq C & (b) \end{cases}$$

约束(a)中的正整数 R 可以根据文献[15]的相关方法进行计算得到, 本例中 $R=8$; 约束(b)中的 C 为满足公平性两变迁的发生次数之差, 这个数值可以人为指定。

为了图形的简洁性, 在图 7 给出的变迁协调控制器设计方案中将省略图 6 中的库所 $f_i (i=1, 2, 3)$ 及其相关联的弧(点线)。

通过图 7 将变迁约束条件转换为库所约束条件, 转换后的库所约束条件为: $M(con_3) \leq R$ 。

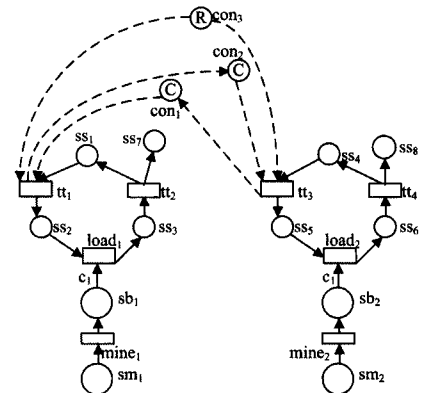


图 7 变迁协调控制器设计方案

结束语 本文以事件驱动系统中变迁协调控制器的设计为研究目标, 针对变迁 $\leq$ 不等式约束 $\sum_{i=1}^q y_i * P(t_i) \leq \omega$, 研究不同情形下将变迁约束转换为加权 Petri 网的库所约束, 从而使事件驱动系统中的变迁库所混合约束问题消解成单一的库所约束问题。目前库所约束问题的求解已经有很多较完善的求解算法, 因此将变迁库所混合约束问题变换成单一的库

(下转第 116 页)

Scheduling Algorithm Based on Carrier Weight in LTE-Advanced System with Carrier Aggregation[C]//Wireless and Optical Communication Conference(WOCC). 2013;1-5

- [7] Wand Chia-pin, Huang Jeng-ji, Su Chun-gen. Buffer-Aware and Delay-Sensitive Resource Allocation in the Uplink of 3GPP LTE Networks[J]. Wireless Personal Communication, 2015, 84(3): 1877-1890
- [8] Wang Y, Pedersen K I, Sorensen T B, et al. Carrier load balancing and packet scheduling for multi-carrier systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(5): 1780-1789
- [9] Tian Hui, Gao Song-tao, Zhu Jian-chi, et al. Improved component carrier selection method for non-continuous carrier aggregation in LTE-advanced systems[C]//IEEE Vehicular Technology Conference(VTC Fall). 2011;1-5
- [10] AlQerm I, Shihada B, Enhanced S K G. Enhanced Cognitive Ra-

dio Resource Management for LTE Systems[C]//IEEE 9th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications(WiMob). 2013;565-570

- [11] Jang H, Lee Y. QoS-constrained resource allocation scheduling for LTE network[C]//2013 International Symposium on Wireless and Pervasive Computing(ISWPC). 2013;1-6
- [12] Liu F, Zheng K, Xiang W, et al. Design and performance analysis of an energy-efficient uplink carrier aggregation scheme[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(2):197-207
- [13] Murata T. Petri nets; Properties, Analysis, and Application[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(4):541-580
- [14] Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Base Station(BS) radio transmission and reception[R]. Technical Report 36. 104, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Apr 2011

(上接第 110 页)

所约束问题有利于复杂系统的结构设计,可以降低系统整体的设计难度。

基于本文的研究结论,下一步将继续研究一些更为复杂的协调控制设计器,如混杂 Petri 网系统中的变迁协调控制器、 $\geq$ 不等式约束向 $\leq$ 不等式约束的转换方法,以及多变迁“减法”次数约束协调控制器等。

参 考 文 献

- [1] Ramadge P J, Wonham W M. Supervisory control of a class of discrete event processes[J]. Siam Journal on Control and Optimization, 1987, 25(1):206-230
- [2] Ramadge P J, Wonham W M. Modular feedback logic for discrete event system[J]. Siam Journal on Control and Optimization, 1987, 25(5):1202-1218
- [3] Wang S G, Xu Z W. The synthesis of Petri nets controller for general inequality constraints with uncontrollable transitions [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(9): 1551-1555(in Chinese)
王寿光,许振伟.带有不可控变迁的一般不等式约束的 Petri 网控制器综合[J].上海交通大学学报,2007,41(9):1551-1555
- [4] Luo J L, Wu W M, Dong L D, et al. Supervisor synthesis for a class of discrete event systems[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(4):621-624(in Chinese)
罗继亮,吴维敏,董利达,等.一类离散事件系统的控制器综合[J].控制理论与应用,2007,24(4):621-624
- [5] Xu S S, Dong L D, Zhu D, et al. Redundancy detection and structure simplification for a class of liveness-enforcing Petri net supervisors[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(6):673-682(in Chinese)
徐珊珊,董利达,朱丹,等.一类活性 Petri 网控制器的冗余检测及结构简化[J].控制理论与应用,2013,30(6):673-682
- [6] Hu H S, Zhou M C, Li Z W. Liveness and ratio-enforcing supervision of automated manufacturing systems using Petri nets[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, A, 2012, 42(2):392-403

- [7] Li Z W, Zhang J, Zhao M. Liveness-enforcing supervisor design for a class of generalized Petri net models of flexible manufacturing systems[J]. IEEE Transaction on Control Theory and Applications, 2007, 1(4):955-967
- [8] Li S Y, An A M, Cai Y, et al. A deadlock control policy for a subclass of Petri nets G-system[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(11):1430-1437(in Chinese)
李绍勇,安爱民,蔡颖,等. Petri 网的子类 G-system 网的死锁控制策略[J].控制理论与应用,2013,30(11):1430-1437
- [9] Wu N Q, Zhou M C. System modeling and control with resource-oriented Petri nets [M] // Control Engineering Series. Newyork, USA: CRC Press, 2009
- [10] Li Z W, Zhou M C. Deadlock resolution in automated manufacturing systems [M] // A Novel Petri Net Approach. London, UK: Springer, 2009
- [11] Li S Y, Wang A R. A deadlock prevention policy in Petri nets using necessary siphons [J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(6):771-780(in Chinese)
李绍勇,王安荣.应用必需信标的 Petri 网死锁预防策略[J].控制理论与应用,2011,28(6):771-780
- [12] Li S Y, Li Z W. Structure reduction of liveness-enforcing Petri nets using mixed integer Programming [J]. Asian Journal of Control, 2012, 14(2):384-399
- [13] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京:机械工业出版社,2006
- [14] Fang H, Lu Y, Huang Z J, et al. Synchronization distance determination and synchronization controller design for hybrid Petri nets[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(7):884-892 (in Chinese)
方欢,陆阳,黄镇谨,等.混杂 Petri 网系统同步距离求解及同步控制器设计[J].控制理论与应用,2012,29(7):884-892
- [15] Fang H, Lu Y, Xu Z J, et al. Resource allocation model and deadlock-free optimization scheduling for underground locomotive transportation [J]. System Engineering-Theory & Practice, 2013, 33(8):2087-2096(in Chinese)
方欢,陆阳,徐自军,等.井下机车运输调度的资源分配模型及无死锁优化调度[J].系统工程理论与实践,2013,33(8):2087-2096