

基于 Petri 网的无死锁控制器设计^{*})

韦娜 赵咪 闫明明

(西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071)

摘要 对柔性制造系统提出了一种新的死锁预防控制算法。运用区域理论对 Petri 网模型设计一个控制器,对控制器中所有严格极小信标求取控制库所与资源库所的代数式,保证了所有的严格极小信标受控。与现有方法相比,该策略不必考虑控制器结构,只需根据这些代数式分布控制器中的资源,就可以得到相应无死锁监督控制器。

关键词 柔性制造系统,死锁预防,Petri 网,区域理论

Design of Deadlock-free Supervisors Based on Petri Nets

WEI Na ZHAO Mi YAN Ming-ming

(School of Electro-Mechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract A new deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems (FMS) was presented. A supervisor for Petri nets model using the theory of regions was designed. An algebraic expression about control places and resource places for all the strict minimal siphons (SMS) of the supervisor were obtained to ensure the controllability of them. Compared with the existing policies, the advantage of this paper is that resources allocation in the supervisor follows the expressions only, which result in obtaining a deadlock-free supervisor without changing the structure of the supervisor.

Keywords FMS, Deadlock prevention, Petri net, Theory of regions

人们通常用 Petri 网来解决离散事件系统(DES)中的死锁问题,特别是柔性制造系统(FMS)中的死锁问题。Petri 网可以用来检测模型系统的死锁、活性、可逆性,且死锁处理方法分为死锁检测与校正^[2]、死锁避免^[3-7]、死锁预防^[8-14]。其中最常见的是死锁预防方法,可以通过添加控制库所来避免死锁的发生。Ezpeleta^[9]第一次运用 Petri 网的结构理论为 FMS 设计基于控制库所的活的控制器。

许多文献都提到被禁库所: 1) 合法的库所 L 可以由一系列先行不等式约束表示出来; 2) L 是可控的,即 $\forall m \in L$, 只发射其中不可控变迁得不到被禁标识。在这两个条件下,只要对原网模型添加一些控制库所,就可以使得到的监督控制器具有最大许可行为。利用区域理论来设计 Petri 网控制器,即可获得具备最大许可行为的控制器。但是,如果原网模型的初始信标发生变化,那么人们必须重新对原网进行分析。而且,若原网的规模非常大,则会出现状态爆炸的情况,从而增加了设计控制器的难度。

本文提出了一种新的控制器设计算法。首先简化原网模型,并用区域理论对其设计控制器;其次计算控制器中的所有严格极小信标(SMS);针对每个 SMS,求取由该信标中包含的库所托肯数组组成的代数表达式,来保证所有信标都不会被清空;最后,给出满足这些关系式的初始标识集合,这样在不改变原控制器模型结构的基础上即可得到新标识下的监督控制器。

1 基本知识

1.1 Petri 网

Petri 网(库所/变迁网)定义为四元组 $N=(P, T, F, W)$, 其中 P 代表库所的集合,库所用圆圈表示; T 代表变迁的集合,变迁用长方框表示, P 和 T 是有限非空且不相交的集合; $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 称为有向弧集合; $W: F \rightarrow IN \setminus \{0\}$ 称为 F 中弧上的权, $IN = \{0, 1, 2, \dots\}$ 。当且仅当 $\forall f \in F, W(f) = 1$ 时,称 $N=(P, T, F, W)$ 为普通网(ordinary net),记作 $N=(P, T, F)$ 。节点集 $X \subseteq P \cup T$ 的前置集(后置集)定义为 $\cdot X = \bigcup_{x \in X} \cdot x (X' = \bigcup_{x \in X} x')$ 。 N 的标识是映射 $M: P \rightarrow IN, M(p)$ 表示库所 p 中托肯的个数,称 (N, M_0) 为网系统或标识网,其中 M_0 为网 N 的初始标识。关联矩阵 $[N]$ 是 $|P| \times |T|$ 维的整数矩阵,且 $[N](p, t) = W(t, p) - W(p, t)$ 。若 $\forall i \in \{1, 2, \dots, n-1\}, x_{i+1} \in x_i'$, 其中 $\forall x \in \{x_1, \dots, x_n\}, x \in P \cup T$, 则 $x_1 \dots x_n$ 称为 N 的一条路径。简单路径是从 x_1 到 x_n 节点各不相同的路径,记为 $SP(x_1, x_n)$ 。网 $N=(P, T, F, W)$ 的状态机构件 $N'=(P', T', F', W')$, 是一个状态机,且是 N 的一个子集,由 P_0 中库所及它们前置集、后置集和相关弧构成。如果一个网被状态机构件覆盖,则认为该网是能进行状态机分解的。如果 $\cdot S \subseteq S'$, 则非空集合 $S \subseteq P$ 是一个信标。若信标 S 中不含有其它的信标子集,则称为极小信标。若极小信标 S 满足 $\cdot S \subseteq S'$, 则称其为严格极小信标。以 P 为序标的列向量 $I: P \rightarrow Z$ 称为 N 的 P -向量, Z 是整数的集合。当且仅当 $I \neq 0$ 且 $I^T[N] = 0^T$ 时,称 P -向量 I 是一个 P -不变式。 $\|I\| = \{p \in P | I(p) \neq 0\}$ 称为 I 的支撑。若 I 是 (N, M_0) 的 P -不变式,则 $\forall M \in R(N, M_0)$ 有 $I^T M = I^T M_0$ 。在普通网中,若 $I^T M_0 > 0$ 且 $\{p \in P | I(p) > 0\} \subseteq S$, 则信标 S 在 M_0 下被 P -不变式控制。这种信标称为不变式可控信标。如果 f

^{*})国家自然科学基金(60474018),教育部归国留学人员基金(2004-527),教育部归国留学人员实验室基金(03401)。韦娜 博士研究生,从事柔性制造系统 petri 网监督控制理论研究。

$f(S)=0$,其中 $f(S)=\min\{M(S) | M \in R(N, M_0)\}$,那么信标 S 有可能被清空。因此,信标 S 在 $f(S)>0$ 时才是可控的。由于可达状态数太大,所以 $f(S)$ 很难得到。为了避免这种困难,定义了另外一个函数 $F(S)=\min\{M(S) | M=M_0+[N]Y, M, Y \geq 0\}$,其中 M 和 Y 是实数向量, $M=M_0+[N]Y$ 是 (N, M_0) 的状态方程。根据 Petri 网的基本理论,任何一个可达标识 M 都满足这个状态方程,反之则不成立,所以任何满足 $F(S)>0$ 的信标都不可能清空。

1.2 区域理论与控制器设计

设 G 为有向图,且弧被 T 中的变迁标记,其中 T 为变迁集合。设 G 中存在一个节点 S_0 ,从它到任何节点都存在一条路径。区域理论^[1]的目标是要找到一个纯网 (N, M_0) ,使得 T 为它的变迁, G 为它的可达图,节点 S_0 为它的初始标识 M_0 。

本节讲述如何应用区域理论来设计控制器。在控制器设计问题中,并不需要为控制系统重新构造一个网模型,只需计算一组控制库所集合 $\{V_s\}$,并将其加入原网,便可得到新的控制器。

在网系统 (N, M_0) 的可达图 G 中,所有的标识一般被分成 4 类:死锁标识、坏标识、危险标识和好标识。死锁标识对应着一个死锁状态,此状态无后继标识。坏标识必然会导致死锁标识的产生。危险标识则可能导致坏标识或死锁标识的产生。除去这三类后的标识叫做好标识。好标识和危险标识的集合表示为 $R_L(N, M_0)$ 。基于区域法所得的控制器, $R_L(N, M_0)$ 中的标识为其有效行为。

下面应用区域理论来设计需添加的控制库所集合 $\{V_s\}$ 。设 V_s 为新添加的控制库所,因为 $R_L(N, M_0)$ 中的任意标识 M 在添加 V_s 后必须仍是可达状态,所以 V_s 需满足可达条件(1),即

$$\begin{aligned} M(V_s) &= M_0(V_s) + [N](V_s, \cdot) \vec{\Gamma}_M \geq 0 \\ \forall M \in R_L(N, M_0) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 Γ_M 为 $R_L(N, M_0)$ 中从 M_0 到 M 的一条不定向路径。

类似地, V_s 需满足 $R_L(N, M_0)$ 中每个循环所对应的循环等式(2),即

$$\begin{aligned} \sum_{t \in T} [N](V_s, t) \vec{\gamma}[t] &= 0 \\ \forall \gamma \in S_c \end{aligned} \quad (2)$$

其中 S_c 代表 $R_L(N, M_0)$ 中所有的循环集合。

将所有的事件分离事例构成的集合用 Ω 表示, Ω 中的每个元素可以通过添加库所 V_s 得到解决,所以需添加的控制库所的数目最多等于要分离的状态变迁数目。因此,添加的每个 V_s 至少要解决 Ω 中的一个事件分离事例 (M, t) ,即

$$M_0(V_s) + [N](V_s, \cdot) \vec{\Gamma}_M + [N](V_s, t) \leq -1 \quad (3)$$

因此,通过式(1)-(3)可以设计出控制库所 V_s 。

在分析设计控制器时,无需考虑状态分离条件,因为原网模型中现有的库所已经满足此条件。

由于不同的事件分离事例可能有相同的解,所以要解决所有的事件分离事例,需添加控制库所的数目要比事件分离事例的数目少得多。

2 无死锁初始标识设计及死锁预防策略

区域法是通过添加控制库所分离事件与危险状态和死状态,从而达到死锁预防的目的。它可以获得最大行为许可的 Petri 网控制器,但是该方法的缺点也显而易见:因为要计算原网可达图和解大量的不等式,所以计算量过大,且规模庞大的网系统会出现难以克服的状态爆炸问题。综上所述,在原

网规模不是很大,可达状态数较少的时候,应用区域法获得控制器,可以充分发挥区域法的优点。

本节中的死锁预防算法主要解决以下问题:如何在已知控制器的情况下,当原网模型中的初始标识变化时,可以很方便地设计出新的控制器。

当柔性制造系统中的资源数目调整,即原网模型中的初始标识变化时,现有的控制器已不能满足死锁预防的要求,这时就需要重新设计控制器。由于区域法的计算量很大,而初始标识每变化一次,就需要重新计算一次控制器,因此此时采用区域法是不可取的。另一方面,虽然初始标识变化,但网的结构一直保持不变,由此我们可以想到:是否可以避免重新计算控制器的结构,只需调整控制库所中的托肯数,从而设计出新的控制器?

性质 1^[12] 若 Petri 网中的每个严格极小信标 S 都满足 $F(S)>0$,则网系统无死锁。其中 $F(S)$ 定义如下:

$$F(S) = \min\{M(S) | M = M_0 + [N]Y, M \geq 0, Y \geq 0\}$$

对于严格极小信标 S ,若 $F(S)=0$,则式(4)有解:

$$\begin{aligned} M_0 + [N]_p Y &\geq 0, \forall p \in P \setminus S \\ M_0 + [N]_p Y &= 0, \forall p \in S \\ Y &\geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $[N]_p$ 表示在关联矩阵 $[N]$ 中库所 p 所对应的行向量,式(4)的矩阵形式为: $[N]1Y \geq -M1_0$, $[N]2Y \geq -M2_0$, $Y \geq 0$,其中 $[N]1$ 和 $[N]2$ 分别对应着 $P \setminus S$ 和 S 中的库所。

式(4)无解等同于下式无解:

$$\begin{aligned} u^T [N]1 + v^T [N]2 &\leq 0 \\ u^T M1_0 + v^T M2_0 &\geq 0, u \geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

由 $u^T C1 + v^T C2 \leq 0$ 和 $u \geq 0$ 可求出一组解,用 $K(S)$ 表示解的集合。显而易见,式(5)可转化为

$$\begin{aligned} u^T M1_0 + v^T M2_0 &\geq 0, \\ \forall [u, v] \in K(S) \end{aligned} \quad (6)$$

性质 2 Petri 网中的每个严格极小信标 S 都不满足条件式(6),则网系统无死锁。

算法: 无死锁初始标识的死锁预防算法

输入:存在死锁的网系统 (N, M_0) 。

输出:活性控制器 (N', M_0') 。

步骤 1) 根据 1.2 中方法对网系统 (N, M_0) 设计控制器并输出受控网系统 (N', M_0') 。

步骤 2) 求 (N', M_0') 中所有 SMS 的集合 Π ,令 $\Pi = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ 。

步骤 3) $i := 1$ 。

步骤 4) $A_i := \Phi$ 。

步骤 5) 若 $i \geq m+1$,则转步骤 9)。

步骤 6) 根据(6)计算约束初始标识且保证 $F(S_i) > 0$ 的条件 A_i 。

步骤 7) $A_i := A \wedge A_i$ 。

步骤 8) $i := i+1$; 转步骤 5)。

步骤 9) 输出条件 A 。

步骤 10) 根据条件 A ,调整网系统 (N', M_0') 中每个库所包含的托肯数,设计出新的控制器。

步骤 11) 输出控制器网系统 (N', M_0') 。

3 FMS 实例

图 1 所示的 FMS 单元中,有两台机床 $M1$ 和 $M2$,每台机床可以加工一个工件。该单元有一台机器人 R ,可以夹持一个工件。 R 负责工件从 $M1$ 到 $M2$ 和从 $M2$ 到 $M1$ 的运送工作。工件通过上料器 $I1$ 和 $I2$ 进入该 FMS 单元,通过下料器

O1 和 O2 离开该 FMS 单元。该单元包含两个加工进程 P1 和 P2。与此 FMS 单元对应的 Petri 网模型如图 2 所示。

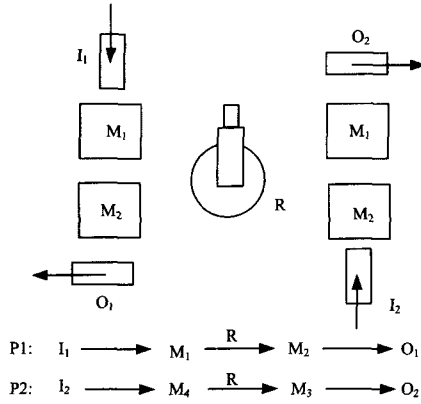


图 1 一个 FMS 实例

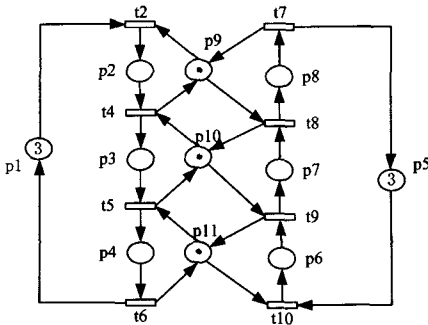


图 2 一个 FMS 单元的 Petri 网模型 (N, M_0)

图 2 所示 Petri 网模型有 20 个状态(存在死锁状态), 包含两个工作进程, 将网系统记为 (N, M_0) 。计算分离状态 N_{sp} 和保留状态 N_{RL} 的个数得到 $N_{sp} = 54, N_{RL} = 17$ 。根据算法, 首先用区域法对其求控制器, 记为 (N', M_0') , 如图 2 所示, 且 (N', M_0') 是具有最大许可行为的控制器。

图 3 所示 Petri 网包含 7 个 SMS: $S_1 = \{P_4, P_7, P_{10}, P_{11}\}, S_2 = \{P_4, P_8, P_9, P_{11}, P_{12}, P_{13}\}, S_3 = \{P_4, P_7, P_{11}, P_{12}, P_{13}\}, S_4 = \{P_4, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}\}, S_5 = \{P_3, P_8, P_9, P_{12}, P_{13}\}, S_6 = \{P_3, P_7, P_{12}, P_{13}\}, S_7 = \{P_3, P_8, P_9, P_{10}\}$ 。首先对 S_1 求取使其不被清空的约束条件, 得到 $u = [u_1, u_2, u_3, u_5, u_6, u_8, u_9, u_{12}, u_{13}, u_{14}]^T, v = [v_4, v_7, v_{10}, v_{11}]^T$ 。 $K(S_1)$ 的解包含 $[u_1, u_2, u_3, v_4, u_5, u_6, v_7, u_8, u_9, v_{10}, v_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}]^T = [0, 0, 0, -1, 0, 0, -1, 0, 0, -1, -1, 0, 1, 0]$ 。所以, 当且仅当 $m_{13} - m_4 - m_7 - m_{10} - m_{11} < 0$ 时, $F(S_1) > 0$ 。因为 $m_4 = 0, m_7 = 0, A_1$ 简化为 $m_{13} < m_{10} + m_{11}$ 。

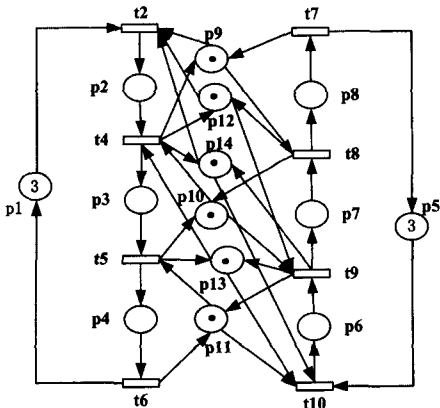


图 3 FMS 单元的控制器模型 (N', M_0')

对 $S_2: u = [u_1, u_2, u_3, u_5, u_6, u_7, u_{10}, u_{14}]^T, v = [v_4, v_8, v_9, v_{11}, v_{12}, v_{13}]^T$ 。 $K(S_2)$ 的解包含 $[u_1, u_2, u_3, v_4, u_5, u_6, u_7, v_8, v_9, u_{10}, v_{11}, v_{12}, v_{13}, u_{14}]^T = [0, 0, 0, -1, 0, 0, 0, -1, -1, 0, -1, 0, 0, 1]^T$, 即当且仅当 $m_{14} - m_4 - m_8 - m_9 - m_{11} < 0$ 时, $F(S_2) > 0$, 因为 $m_4 = 0, m_8 = 0, A_2$ 简化为 $m_{14} < m_9 + m_{11}$ 。

同理对 S_3 求解得到 $A_3: m_{14} < m_{11} + m_{12}$; 对 S_4 求解得到 $A_4: m_{14} < m_9 + m_{11}$; 对 S_5 求解得到 $A_5: m_{14} < m_9 + m_{13}$; 对 S_6 求解得到 $A_6: m_{14} < m_{12} + m_{13}$; 对 S_7 求解得到 $A_7: m_{12} < m_9 + m_{10}$ 。

因为 A_2 和 A_4 相同, 所以该网系统到达死锁状态的条件 A 为

$$A: \begin{cases} m_{13} < m_{10} + m_{11} \\ m_{14} < m_9 + m_{11} \\ m_{14} < m_{11} + m_{12} \\ m_{14} < m_9 + m_{13} \\ m_{14} < m_{12} + m_{13} \\ m_{12} < m_9 + m_{10} \end{cases}$$

例如, 当原网模型的初始标识从 $M_0 = [3, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 1, 1, 1]$ 变为 $M_0' = [3, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 2, 2, 2]$ 时, 图 3 所示的控制器将不能满足控制器无死锁的特性, 所以需要为网系统 (N, M_0) 设计一个新的控制器。本文的方法只需要改变控制器中托肯数, 按照条件 A 重新分配即可得到新的控制器, 省去了重新设计控制器(包括结构和初始标识)。

对条件 $A_1: m_{13} < m_{10} + m_{11} = 4$, 令 $m_{13} = 3$, 对 A_2 和 $A_4: m_{14} < m_9 + m_{11} = 4$, 令 $m_{14} = 3$, 对 $A_3: m_{14} < m_{11} + m_{12} = 2 + m_{12}$, 因为在条件 A_7 中 $m_{12} < m_9 + m_{10} = 4$, 假定 $m_{12} = 3$, 然后检测条件 A_5 和 A_6 , 看它们是否成立。完成上述步骤后, 最终得到 $m_{12} = m_{13} = m_{14} = 3$, 即图 3 中的结构在初始标识为 $M_0' = [3, 0, 0, 0, 3, 0, 0, 0, 2, 2, 2, 3, 3, 3]$ 的情况下是无死锁的。

表 1 所示为本文方法得到的控制器和另外一种方法得到的控制器性能比较。首先, 利用区域理论得到最大许可行为的保留状态数 N_{RL} , 然后根据文中方法计算控制库所中的托肯数, 并计算最终控制器的许可行为 N_m 。

表 1 控制性能比较

$p1, p5, p9, p10, p11, p12, p13, p14$	N_{RL}	N_m	N_m/N_{RL}
3, 3, 2, 2, 2, 3, 3, 3	142	139	97.89%
4, 4, 3, 3, 3, 5, 5, 5	594	590	99.33%
5, 5, 4, 4, 4, 7, 7, 7	1752	1748	99.77%
6, 6, 5, 5, 5, 9, 9, 9	4289	4285	99.91%
7, 7, 6, 6, 6, 11, 11, 11	9260	9256	99.96%
8, 8, 7, 7, 7, 13, 13, 13	18227	18223	99.98%
9, 9, 8, 8, 8, 15, 15, 15	33399	33395	99.99%

通过表 1 可知: 一方面, 当原网的初始标识增加时, 可达状态数增长很快, 而且事件分离事例的数目也会随之增长。由于采用区域法重新设计控制器, 需生成可达图, 同时要针对每个事件分离事例解析大量的不等式, 从而导致计算量增大。另一方面, 基于无死锁初始标识, 则可以快速地算出控制库所中的托肯数, 从而设计出新的控制器。虽然与区域法相比, 基于无死锁初始标识得到的新控制器, 可达状态数略有降低, 但计算量的复杂度大大降低。对于结构简单、初始标识较复杂的网系统, 此方法具有绝对优势。

结束语 基于 Petri 网提出了一种有效的死锁预防策略。

(下转第 280 页)

取逆规则,得到结果直观含义如下:

如果小组士气低,则引入缺陷多且项目拖延。

定位问题的原因,可能是由于任务量的加剧,而导致了成员的工作压力增大,造成了士气低落,并在开发过程中不断地引入错误,对完成开发任务没有信心,继而无法保质保量完成开发任务,致使整个项目开发进入恶性循环。挖掘出这样的规则,可以对后续的开发有效地进行过程跟踪和控制,当引入缺陷多,且造成进度拖延时,要时刻监控小组成员的士气,积极与他们沟通,发现困难并帮助解决。如果存在技术上的难题,技术支持经理则需对小组进行一次有效的技术培训,以提高成员的工作能力,继而提高整个开发小组的士气,逐渐减少引入的缺陷数。当考察的因素增多时,通过挖掘,还能够得到更多因素间潜在的关联关系。

结束语 本文改进了原有的 TSP 度量方法,将形式概念分析理论融入到 TSP 度量当中。提出了基于模糊概念格的关联规则挖掘的技术,用于挖掘过程数据库中的有价值信息,其可以对后续的过程改进提供有效的建议。

参考文献

- [1] Humphrey W S. 小组软件开发过程[M]. 韩丹,袁昱,译. 北京:人民邮电出版社,2002
- [2] Wille R. Restructuring Lattice theory: an approach based on hierarchies of concepts//Rival I, ed. Ordered Sets. Dordrecht Reidel, 1982; 445-470
- [3] 谢志鹏. 概念格及扩展模型研究[D]. 合肥工业大学计算机学院,2001
- [4] 强宇. 概念格分布处理及其框架下的知识发现研究[D]. 上海:上海大学计算机工程与科学学院,2005
- [5] Han Jiawei, Kamber M. Data Mining: Concept and Techniques[M]. Simon Fraser University, Canada, 2000
- [6] 谢志鹏,刘宗田. 概念格的快速渐进式构造算法. 计算机学报, 2002, 25(5): 490-496
- [7] 强宇,刘宗田,等. 一种模糊概念格构造算法研究. 计算机工程与

应用,2004,4:13-19

- [8] 谢志鹏,刘宗田. 概念格与关联规则发现. 计算机研究与发展, 2000, 37(12): 1415-1421
- [9] 强宇,刘宗田,等. 模糊概念格在知识发现的应用及一种构造算法. 电子学报, 2005, 33(2): 350-353
- [10] 强宇,刘宗田,李旭. 一种基于模糊概念格的关联规则构造方法. 计算机科学, 录用
- [11] Pressman R S. 软件工程:实践者的研究方法[M]. 梅宏,译. 北京:机械工业出版社,2002
- [12] Function I, Point Users Group. IT 度量——专家实践[M]. 方德英,译. 北京:清华大学出版社,2003
- [13] 卡耐基梅隆大学软件工程研究所. 能力成熟度模型(CMM): 软件过程改进指南[M]. 刘孟仁,等译. 北京:电子工业出版社, 2001
- [14] Galin D, Avrahami M. Do SQA programs work - CMM works: a meta analysis // Software - Science, Technology and Engineering, 2005 Proceedings. 2005; 95-100
- [15] Dangle K C, Larsen P, Shaw M, et al. Software Process Improvement in Small Organizations: A Case Study. Software, IEEE, 2005, 22(6): 68-75
- [16] von Kinsky B R, Robey M. A Case Study: GQM and TSP in a Software Engineering Capstone Project. Software Engineering Education and Training // Proceedings. 18th Conference. April 2005; 215-222
- [17] Sebern M J, Hilburn T B. Integrating Software Engineering Process in an Undergraduate Curriculum // Software Engineering Education and Training, CSEE&T 2005. Proceedings. 18th Conference. April 2005; 245-248
- [18] Priya G V S. Walking the talk: building quality into the software quality management tool. Seshagiri, Quality Software // Proceedings. Third International Conference. Nov. 2003; 67 - 74
- [19] 李建章,万江平. 中小型软件企业项目管理的思考. 计算机应用研究, 2003, 22(9): 14-17

(上接第 257 页)

结合区域理论,合理分配控制库所和资源库所中的资源来保证新的控制器系统不存在死锁状态。当原网模型资源分配改变时,只需改变控制器中控制库所的标识而不必改变其结构,即可获得结构简单的,许可行为趋于最优的控制器。

参考文献

- [1] Ghaffari A, Rezg N, Xie X L. Design of a live and maximally permissive Petri net controller using the theory of regions. IEEE Trans. Robot. Automat., 2003, 19(1): 137-141
- [2] Wysk R A, Yang N S, Joshi S. Detection of deadlocks in flexible manufacturing systems. IEEE Trans. Robot. and Automat., 1991, 7(6): 853-859
- [3] Banaszak Z, Krogh B H. Deadlock avoidance in flexible manufacturing systems with concurrently competing process flows. IEEE Trans. Robot. And Automat., 1990, 6(6): 724-734
- [4] Hsien F S, Chang S C. Dispatching - driven deadlock avoidance controller synthesis for flexible manufacturing systems. IEEE Trans. Robot. And Automat., 1994, 10(2): 196-209
- [5] Xing K Y, Hu B S, Chen H X. Deadlock avoidance policy for Petri-net modelling of flexible manufacturing systems with shared resources. IEEE Trans. Automatic Control., 1996, 41(2): 289-295
- [6] Park J, Reveliotis S A. Deadlock avoidance in sequential resource allocation systems with multiple resource acquisitions and flexi-

ble routings. IEEE Trans. Robot. and Automat., 2001, 46(10): 1572- 1583

- [7] Abdallah I B, ElMaraghy H A. Deadlock prevention and avoidance in FMS: a Petri net based approach. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1998, 14(4): 704-715
- [8] Jeng M D, Xie X L, Peng M Y. Process nets with resources for manufacturing modeling and their analysis. IEEE Trans. Robot. and Automat., 2002, 18(6): 875-889
- [9] Ezpeleta J, Colom J M, Martinez J. A Petri net based deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems. IEEE Trans. Robot. and Automat., 1995, 11(2): 173-184
- [10] Li Z W, Zhou M C. Elementary siphons of Petri nets and their application to deadlock prevention in flexible manufacturing systems. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., 2004, 34(1): 38-51
- [11] Giua A, DiCesare F, Silva M. Petri net supervisors for generalized mutual exclusion constraints // Proc. 12th IFAC World Congr. Sydney, Australia, 1993; 267-270
- [12] Chu F, Xie X L. Deadlock analysis of Petri nets using siphons and mathematical programming. IEEE Trans. Robot. and Automat., 1997, 13(6): 793-804
- [13] Li Z W, Wei N. Deadlock control of flexible manufacturing systems via invariant-controlled elementary siphons of petri nets. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 33(1-2): 24-35
- [14] 赵咪,李志武. 一类离散事件系统的非阻塞监督控制器设计. 西安电子科技大学学报, 2006, 33(5): 735-738