

Petri 网并发进程的死锁避免策略

周建勇¹, 于杰¹, 刘海阳², 孙燕¹, 刘久富¹, 王志胜¹, 杨忠¹, 刘春生¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016;

2. 东南大学 电子工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要:死锁是系统并发进程中特有的问题,由于发生的不确定性,死锁检测和消除非常困难。在以分支界定法设计最优监控器的基础上,提出了一种可以最大限度保证静态和行为特性任意配置的死锁监控器集成设计方法。该方法通过可达图分析,在满足静态特性和行为特性下,进行可达图删减,从而实现合法标识和非法标识的分离,对分离出的标识建立混合整数线性规划模型,运用分支定界法得到补充监控库所广义互斥约束模型作为最优监控器,保证了死锁的避免和资源的最大允许利用。以多进程码垛机器人加工系统为例,建立了 Petri 网模型,结合零件加工过程中资源的占用和释放,对柔性制造系统进行控制器设计。设计的控制器拥有更严格的约束和更简化的模型,对死锁标识的避免是充分的,验证了该算法的有效性。

关键词:Petri 网;监控器;死锁避免;广义互斥约束

中图分类号:TP311

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2016)11-0005-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.11.002

Deadlock Avoidance Policies of Concurrent Process for Petri Net

ZHOU Jian-yong¹, YU Jie¹, LIU Hai-yang², SUN Yan¹, LIU Jiu-fu¹, WANG Zhi-sheng¹,

YANG Zhong¹, LIU Chun-sheng¹

(1. Department of Automation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Deadlock is a unique error in concurrent process. Due to the uncertainty of the occurrence, it is difficult to detect and eliminate the deadlock. Building on recent results regarding optimal supervisor design with branch & bound methods, an integrated modeling approach is proposed that can be used to derive a minimal supervisor guaranteeing the attainment of an arbitrary set of static and behavioral specifications in a maximally permissive way. This method prunes the reachability graph by the analysis of graph, to ensure the separation of legal markings and illegal markings, and builds the mixed integer linear programming to obtain generalized mutual exclusion constraints as the optimal supervisor. The system model of FMS is built with Petri Net. Based on the occupation and release of resource in the machining process, research is made on application in robot processing system. The optimal supervisors generating from the algorithm show stricter constraints and more simplified model, achieving deadlock avoidance policy, which have proved the effectiveness of this method.

Key words: Petri Nets; supervisors; deadlock avoidance; generalized mutual exclusion constraints

0 引言

并发进程中由于资源的竞争导致的程序无限等待过程称为死锁。死锁的发生会使整个系统陷于瘫痪,严重影响系统的可用性和可靠性,给生产、生活带来巨大的经济损失,甚至严重的灾害。死锁问题的处理主要有死锁避免、死锁检测与校正、死锁预防这三种方法。

Petri 网作为一种用于描述离散、分布式系统的数学建模工具,被用于离散事件系统的建模与分析,其特有的冲突、可达、有界及活性等特性使得其在并发系统中有很好的应用。死锁避免策略通过添加控制库所限制变迁的触发使危险状态和死锁状态分离,由此来获得最佳的和最大行为许可的 Petri 网控制器。

针对并发进程中的死锁避免策略的监控器设计在

收稿日期:2015-01-20

修回日期:2015-06-10

网络出版时间:2016-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60674100);南京航空航天大学专项资助项目(NS2010069)

作者简介:周建勇(1990-),男,硕士研究生,研究方向为软件工程、离散控制;刘久富,博士,硕士研究生导师,通信作者,研究方向为软件工程、机器人。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160918.1707.002.html>

最近的文献中颇受关注。文献[1]通过计算与资源分配系统密切相关的信标确定控制器,但随着网图规模呈指数性增长的信标数量使得相应的 Petri 网控制器在结构上过于复杂。文献[2]通过构造矩阵方程的方法设计分类器,但同样要保证矩阵方程满足相容条件才能判断是否存在符合要求的控制器。因此,设计同时具有最大允许度和死锁避免的监控器显得尤为重要。Cordone 等^[3-7]提出了一种有效的监控器设计方法,基于广义互斥约束将非法标识集从整个合法标识集向多个子集的合适分离,通过分支定界法有效解决分类的系统探索问题。

文中解决了监控器设计中死锁避免的问题,将监控器设计与约束建模相结合。分析了 Petri 网可达性,将可达集分为合法标识集 ℓ 和通过变迁触发可达的死锁标识集 u 。生成过程保证了关于给定特性的 ℓ 的极大性,包括静态和死锁避免等行为特性。特别是,它给出了如何表征带有不可控变迁的网中的合法标识集和有界非法标识集,其中给定的特性都一定要可监控执行。通过分支定界法^[8-11]建立混合不等式模型,进一步保证设计的监控器数量的最优性和结构的简洁性。

1 Petri 网与广义互斥约束的分类问题

1.1 Petri 网基础

定义 1: $PN = \langle P, T, \text{Pre}, \text{Post}, m_0 \rangle$ 为 Petri 网 (Petri Net, PN)。其中, $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 称为库所 (place) 集合; $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 称为变迁 (transition) 集合, $P \cap T = \emptyset$; $\text{Pre}, \text{Post} \in \mathbb{N}^{n_p \times n_t}$ 是输入输出矩阵, $m_0 \in \mathbb{N}^{n_p}$ 是初始标识向量, \mathbb{N} 是非负整数集。 Pre, Post 表示 Petri 网的库所变迁间的拓扑结构^[12]。

定义 2: 在 Petri 网的标识 M 下, 如果资源子集 $R_d \in R$ 满足如下两个条件, 则称 R_d 处于死锁状态, M 被称为死锁标识, 记为 M_d ^[13]。

(1) R_d 中所有资源被占用, 即 $M(p_r) = 0, r \in R_d$ 。

(2) 所有占用 R_d 中资源的操作都在等待 R_d 中其他的资源, 即对于操作 $p_q \in \{p_q \mid R(p_q) \in R_d, M(p_q) > 0\}$, 存在 $^*(p_q^*)r \in \{p_r \mid r \in R_d\}$ 。

1.2 Petri 网的行为规范

Petri 网系统中 $\text{Pre}_{k,j}[\text{Post}_{k,j}]$ 是表示 $p_k[t_j]$ 到 $t_j[p_k]$ 的有向弧权重, 如果两者之间无有向弧, 那么权重为 0。事件矩阵 $C = \text{Post} - \text{Pre}$ 提供了缺少自环的相同信息。标识向量 m 定义了库所中的标识分布。

变迁 $t_j \in T$ 在标识 m 下是使能的当且仅当 $m \geq \text{Pre } e_j$, 其中 e_j 是 \mathbb{R}^{n_p} 坐标空间下的第 j 个向量。如果 $m[t_j]$, 那么 t_j 即可在标识 m 点火, 生成标识 $m' = m + Ce_j$ 。通过使能数据序列从 m_0 可达的标识集就是可

达集, 定义为 $R(N, m_0)$ 。有向图 $RG = (V, A)$ 就是可达图, 其中, $V = R(N, m_0)$ 是节点集, $A \subseteq (V \times V)$ 是有向弧集, 通过标签函数 $h: A \rightarrow T$ 与 Petri 网变迁相连。

有向图的强连通分量是最大子图, 它的任意两个节点都可以通过一个有向路径连接。当某向量不属于任意一个有向循环, 强连通分量有可能只由一个向量组成。令 (S, A_s) 为 RG 的一个强连通分量, 如果 $|S| \geq 2$, 那么 Petri 网在任意数量的变迁点火下都能演变包含 S 。如果对于 $m_1 \in S, m_2 \in V \setminus S$, 不存在任何 $(m_1, m_2) \in A$, 那么 (S, A_s) 是终端强连通分量。 $|S| = 1$ 的可达图的终端强连通量 (S, A_s) 是一个死锁状态。

综上, Petri 网无死锁则所有强连通量都有严格大于 1 的基。

1.3 可达标识的分类问题

广义互斥约束 (Generalized Mutual Exclusion Constraints, GMEC) 表示为 (L, b) , 其中, $L \in \mathbb{N}^{n_p}, b \in \mathbb{N}$, 与可允许区域 $M(L, b) = \{x \in \mathbb{N}^{n_p} \mid L^T x \leq b\}$ 相关。一组广义互斥约束 (L, b) 的允许范围由 $M(L, b) = \bigcap_{i=1}^{n_l} M(L_i, b_i)$ 定义, 其中 $L = [L_1^T, L_2^T, \dots, L_{n_l}^T]^T, b = [b_1, b_2, \dots, b_{n_l}]^T$ 。

令 $m_0 \in M(L, b)$, 那么一个由 n_c 个监控库所组成的监控器可以执行上述约束, 这些监控库所通过事件矩阵 $C_c = -LC$ 与存在的 Petri 网变迁相连并由 $m_{c0} = b - Lm_0$ 标记。设计的控制器仅阻止导致违反任意 GMEC 的变迁点火, 因此也是最大允许的。令 $\{m_0\} \subseteq \ell \subseteq R(N, m_0)$ 并假定存在一组广义互斥约束 (L, b) 保证 $\ell \subseteq M(L, b)$, $M(L, b)$ 不包含任意可达标识。那么监控器 (L, b) 执行 ℓ 。

通过合法标识集 ℓ 限制 Petri 网的可达集的问题和不可控变迁的出现有关。接下来假定 $T = T_c \cup T_{uc}$, $T_c \cap T_{uc} = \emptyset$ 。其中, T_{uc} 是不可控变迁集合 (黑点标识), T_c 是可控变迁集合 (白杠标识), 分别与不可控和可控事件相连^[14]。

定义 3: 给出 Petri 网 $N, T_c \neq \emptyset$, 定义 N 的不可控子网 N_u 为 N 中消除所有可控变迁后的子网。

定义 4: 如果 $\bigcup_{m \in L} R(N_u, m) \subseteq \ell$, 关于初始标识 m_0 的标记 Petri 网 N 的合法标识集 $\ell \subseteq \mathbb{N}^{n_p}$ 是行为可控的, 其中 N_u 是 N 的不可控子网。

另一方面, 如果没有禁止标识, 可以通过一组只包含不可控变迁的点火序列从属于 ℓ 的任意标识可达, 那么 ℓ 是可控的。

如果有一条从控制库所到 t 的弧且控制库所是标

记的,网标识使能的变迁 t 可以通过 Petri 网监控器禁止。因此,为了通过 Petri 网控制器执行行为可控合法标识集,如果存在控制库所能够单独禁止变迁的可达标识,必须避免从控制库所到不可控变迁的有向弧,否则就可以通过本体变迁使能。

一组广义互斥约束 (L, b) 配置了一个线性分类器,将 $M(L, b)$ 中的标识从外部分离出来。如果以下条件成立,非法集合 u 可以根据合法标识集 ℓ 通过分类器进行分类得出。

定理 1:一对互斥标识集 L 和 u , P_L 是 L 的凸包,当且仅当不存在标识 $m \in u$ 使得 $m \in P_L$ 时,存在线性分类器将 L 和 u 分离^[15]。

分离 L 和 u 的最优线性分类器可以通过寻找最优覆盖非法集合 u 的合适子集 u_i , $i = 1, 2, \dots, n_c$, 使得每一个子集都存在一个分离 u_i 和 L 的广义互斥约束。非法集合 u 的可行覆盖可以通过分支定界法进行系统解决。

2 基于 GMEC 的死锁避免策略

为了获得一个非冗余模型,并保证包含最小数量的用以执行约束的监控库所在寻找所有约束集的最优监控集合,PN 建模过程包括两个步骤:

(1)分离合法集 ℓ 和死锁标识集 u 。通过可达性分析生成集合 ℓ 和 u ,死锁标识是可以通过一个变迁触发从 ℓ 可达的。通过禁止死锁标识,将无法达到后续的非合法标志。

(2)求解线性分类器 (L, k) , 将 u 从 ℓ 分离出来,对任意 i 有 $\ell \subseteq M(L, k)$ 并且 $M(L, k) \cap u = \emptyset$, 该分类器性能评估依据主要为添加弧数目和控制库所个数。

2.1 死锁标识集分离

定理 2^[16]:Petri 网 $\langle N, m_0 \rangle$, $RG = (V, A)$, 其中 $V = R(N, m_0)$ 。存在一组广义互斥约束 (L, k) , 满足 $R(N, m_0) \cap M(L, k)$ 为有限集且包含 m_0 。 V^* 为可达标识集,且满足:

(1) $m \in R(N, m_0) \cap M(L, k)$, $m = m_0$ 或者在可达图上存在一个从 m_0 到 m 的直达路径,其所有节点都属于 V^* ;

(2) $\exists m' \in V^* \setminus \{m\}$ 使得 $(m, m') \in A$;

(3) $\forall t_j \notin T$, 存在 $m', m'' \in V^*$, 使得 $(m', m'') \in A$, $h(m', m'') = t_j$, 在可达图上存在一个从 m 到 m' 的直达路径,其所有节点都属于 V^* ;

(4) $\forall m' \notin V^*$, 使得 $(m, m') \in A$, $h(m, m') \in T_c, T_c \subseteq T$ 是可控变迁集。

如果集合 V^* 是空集,则不存在符合要求的分类

器;如果 V^* 非空, V^* 对应的就是最大允许特性的分类器。

合法集合 ℓ 和死锁标识 u 可通过算法 1 获得。

算法 1。

输入: $m_0, PN = (P, T, Pre, Post)$;

输出: ℓ, u 。

(1)初始化算法变量: $V' = \{m_0\}, A' = \emptyset$ 。

(2)构造删减的可达图: $RG' = (V', A')$ 。若 $\forall m \in V', \forall t \in T$, 满足 $m[t]m'$, 其 $m' \in M(L, k)$, 则设置 $A' = A' \cup \{(m, m')\}$; 若 $m' \notin V'$, 则设置 $V' = V' \cup \{m'\}$ 。

(3)依据所要求的行为规范,逐次裁剪下列标识及相关弧的图 RG' 。

①所有属于终端 SCC 状态的维数等于 1。

②对任意标识 $m, \exists t \in T_u, m' \notin V'$ 都满足: $m[t]m'$, 对任意标识 m , 不存在 $m' \in V'$ 使得 $(m', m) \in A'$ 。

首先建立了可达图的最大子图,并包含了使得所有遵守静态约束的状态,其次修剪违反任一行规范的状态。在这个过程中必须要反复迭代第二步,因为行为规范之间会因为任一状态的减少互相影响,同时死锁状态也会被修剪。最终,迭代修剪将 RG' 裁剪为 $RG^* = (V^*, A^*)$ 。

2.2 Petri 网监控器设计

已知 Petri 网 $\langle N, m_0 \rangle$, 给出合法集合 ℓ 和死锁标识集合 u , 则存在一个分离器分离这两个子集。通过算法 1 获得 ℓ 和 u , 下面给出分离这两个集合的线性分离器的求解过程。

构造如下混合整数线性规划不等式 (MIP)^[6]:

$$\text{Max} \sum_{(\ell, u) \in W} \theta_{\ell u} \quad (1)$$

$$\forall x \in \{\gamma\}: \varepsilon + \rho \cdot (\gamma_x - 1) \leq l \cdot x - k \leq \rho \cdot \gamma_x \quad (2)$$

$$\forall (\ell, u) \in W: 2 \cdot \theta_{\ell u} \leq \gamma_u - \gamma_\ell + 1 \quad (3)$$

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}: 0 \leq l[i] \leq 1 \wedge 0 \leq k \leq 1 \quad (4)$$

$$\gamma_x, \theta_{\ell u} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

$$\forall j \in J_0: l[j] = 0 \wedge \forall j \in J_p: l[j] = l'[\Gamma(j)] \wedge k = k' \quad (6)$$

相关参数变量定义如下:

J_0 : 状态空间维度集;

$J_p: J_p \equiv L_p \setminus J_0$;

V_{J_p} : 投影后的 $|J_p|$ 维子空间;

$\Gamma: J_p$ 中元素向子空间 V_{J_p} 的双射;

ε : 分离系数(足够接近于 0);

ρ : 混合整数线性规划中的比例参数(足够大);

$\theta_{\ell u}$:评价 $\gamma_{\ell}[i]$ 与 $\gamma_u[i]$ 的关系参数,当且仅当 $\gamma_{\ell}[i] = 0 \wedge \gamma_u[i] = 1$ 时, $\theta_{\ell u} = 1$ 。

算法2:

输入: $\ell, u, \varepsilon, \rho$;

输出: (L, k) 。

(1) 初始化算法变量。

$W = \ell \times u, i = 0$

$J_p = L_p, J_0 = \emptyset$

(2) 递归消除非法标识。

while $W \neq \emptyset$ do

$i = i + 1$;

for all $\{j \mid \forall (\ell, u) \in W: \ell[j] \geq u[j]\}$ do

从 J_p 中移除 j ;

end for

将 W 中元素投射到子集 V_{j_p} 中;

$S = \{\ell \mid (\ell, u) \in W\}$

$U = \{u \mid (\ell, u) \in W\}$

$\gamma = S \cup U$

通过输入 W, γ, ε 和 ρ 解混合线性规划不等式

(1) ~ (5) 生成线性不等式 $(L'(i, \cdot), k'[i])$;

通过式(6)由 $(L'(i, \cdot), k'[i])$ 构建 $(L(i, \cdot), k[i])$;

从 W 中删除集合 $\{(\ell, u) \in W \mid \theta_{\ell u} = 1\}$;

end while

(3) 返回 (L, k) 。

由算法2,可以获得执行最紧凑分类器约束 (L, k) , 即

$$L \cdot X \leq k \quad (7)$$

3 实例验证

码垛机器人加工系统在自动化领域发挥着越来越重要的作用。如果存在不可控变迁方面的问题,会对系统产生死锁之类的影响。文中应用最小监控器集成生成方法,求解避免死锁的最小最紧凑广义互斥约束组,以此监控系统的运行。

图1为一个加工三类工件的码垛机器人零件加工

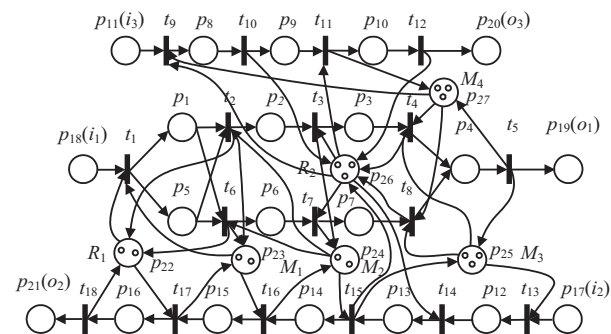


图1 码垛机器人加工系统PN模型

系统的 Petri 网模型。

该系统包含了两个码垛机器人 R_1 和 R_2 , 且每个机器人每次可装载两个或三个工件。另外有四台机床 $M_1 \sim M_4$, 且每台机床可加工两个或三个工件, 同时, 该单元由三个输入缓存 $\text{Input}_1 \sim \text{Input}_3 (i_1 \sim i_3)$, 三个输出缓存 $\text{Output}_1 \sim \text{Output}_3 (o_1 \sim o_3)$ 。该加工系统有三条加工线, 第一条工序 (P_1): R_1 把工件 P_1 从 i_1 装载到 M_1 上加工, 被 M_1 处理后, 由 R_1 移到 M_2 上加工, 被 M_2 处理后, 被 R_2 移到 M_3 上加工, 最后由 o_1 输出; 第二条工序 (P_2): 工件 P_2 从 i_2 装载, 依次通过机床 M_3 、 M_2 、 M_1 , 最后从 o_2 输出; 第三条工序 (P_3): 工件 P_3 从 i_3 装载, 通过机床 M_4 加工, 最后 R_2 将工件从 o_3 卸载。

三个进程在加工工件的同时竞争共享资源 (R_1 , R_2) 和 ($M_1 \sim M_4$), 因此会导致死锁状态的产生。记库所标量 $M(p_i)$ 为 p_i 。

根据机器人 R_1 和 R_2 的装载量约束可得出:

$$p_1 + p_{16} \leq 2 \vee p_2 + p_{16} \leq 2 \quad (8)$$

$$p_3 + p_7 + p_8 + p_{10} + p_{13} \leq 3 \quad (9)$$

根据资源 $M_1 \sim M_4$ 的容量约束可得出:

$$p_1 + p_{15} \leq 2 \vee p_5 + p_{15} \leq 2 \quad (10)$$

$$p_2 + p_6 + p_{14} \leq 2 \quad (11)$$

$$p_4 + p_{12} + p_{13} \leq 3 \quad (12)$$

$$p_3 + p_7 + p_8 + p_{10} + p_{13} \leq 3 \quad (13)$$

求解潜在的死锁状态需要遍历可达标识, 剔除经过某一变迁序列到达死锁状态的标识。首先通过算法1由可达性分析求解可达标识, 本例中满足约束(8)~(10)的标识即为可达标识, 通过可达图分析有 67 800 个标识, 这些标识同时包含了合法标识和有界非法标识, 有界非法标识通过有限的变迁序列触发会最终导致死锁状态的发生。依据算法1第三步可进行迭代删除非法标识实现标识的分离。

通过计算可得到含有 10 525 个合法标识的可达集 ℓ , 由 $u = R(N, m_0) \setminus \ell$ 可推算出非法标识集含有 57 275 个标识。

根据算法2以及分离出的标识集合求解最优的线性规划模型作为补充约束。

$$2p_1 + 2p_2 + 2p_3 + p_8 + p_9 \leq 4 \quad (14)$$

$$2p_1 + p_{12} + p_{13} + p_{14} + p_{15} \leq 5 \quad (15)$$

根据约束(14)、(15)可构建图2所示的死锁监控器, 机器人和机床资源库所未画出, 控制库所由 V_{s_i} 和 V_{s_j} 组成, 容量分别为 4 和 5, 另外需要添加 10 条有向弧。

若采用文献[1]中的算法, 需要添加 25 条弧和 5 个控制库所, 并且合法可达状态个数受到了较大限制, 只有 6 552 个合法状态; 而在文中监控器下, 所有造成死锁的有界非法标识都将被禁止, 添加弧和控制库所

个数明显减少,合法可达状态数量增多,如表 1 所示。

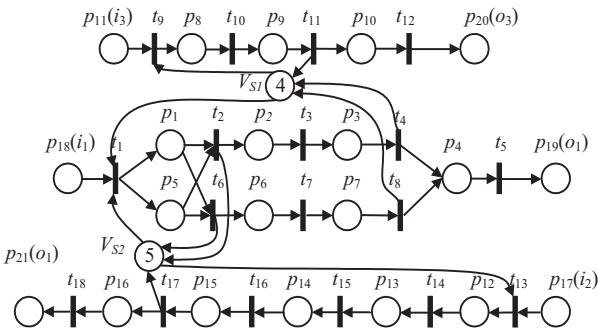


图 2 PN 控制器模型

表 1 控制性能比较

控制规则	文献[1]方法	文中方法
控制库所个数	5	2
添加弧个数	25	10
合法状态数	6 552	10 525

文中监控器在实现死锁避免的同时,又保证了资源的最大利用。

4 结束语

针对多进程码垛机器人加工系统中的死锁问题,提出一种基于广义互斥约束分离的 Petri 网的死锁避免策略。区别于一般的线性规划方法,该策略结合了分支定界法对最优解的求取,避免了重复评价所有可能的组合解,降低了算法的复杂度,保证了 Petri 网的死锁避免特性和最大允许特性。同时,该策略实现了对死锁状态的禁止,其中非法标识的计算在代码量上仍有一定缺陷,随着库所量的增加,系统冗余仍然存在。接下来将研究结合分布式监控器实现对库所的约束,以最小冗余避免死锁的产生。

参考文献:

[1] 胡核算,李志武,王安荣. 基于信标的柔性制造系统的优化死锁预防策略[J]. 控制与决策,2006,21(12):1343-1348.

[2] 罗继亮. Petri 网的一类禁止状态问题的混合型监控器算法设计[J]. 计算机学报,2008,31(2):291-298.

[3] Cordone R, Piroddi L. Parsimonious monitor control of Petri net models of FMS[J]. IEEE Transitions on System, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans, 2013, 43(1): 215-221.

[4] Chen Y F, Li Z W, Khalgui M, et al. Design of a maximally permissive liveness-enforcing Petri net supervisor for flexible manufacturing systems[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2011, 8(2): 374-393.

[5] Nazeem A, Reveliotis S. Designing compact and maximally permissive deadlock avoidance policies for complex resource allocation systems through classification theory: the nonlinear case[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2012, 57(7): 1670-1684.

[6] Nazeem A, Reveliotis S, Wang Y, et al. Designing compact and maximally permissive deadlock avoidance policies for complex resource allocation systems through classification theory: the linear case[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(8): 1818-1833.

[7] Basile F, Cordone R, Piroddi L. Integrated design of optimal supervisors for the enforcement of static and behavioral specifications in Petri net models[J]. Automatic, 2013, 49: 3432-3439.

[8] Nazeem A, Reveliotis S, Wang Y, et al. Optimal deadlock avoidance for complex resource allocation systems through classification theory[C]//Proc of 10th international workshop on discrete event systems. [s. l.]: [s. n.], 2010: 277-284.

[9] Nazeem A, Reveliotis S. A practical approach to the design of maximally permissive liveness-enforcing supervisors for complex resource allocation systems[C]//Proc of 6th IEEE conference on automation science and engineering. [s. l.]: IEEE, 2010: 451-458.

[10] Reveliotis S, Ferreira P. Deadlock avoidance policies for automated manufacturing cells[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1996, 12(6): 845-857.

[11] Banaszak Z A, Krogh B H. Deadlock avoidance in flexible manufacturing systems with concurrently competing process flows[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(6): 724-734.

[12] Zhang Y Y, Yan G F. Synthesis of Petri net supervisors enforcing general constraints[J]. Journal of Zhejiang University, 2006, 7(4): 623-628.

[13] Ghaffari A, Rezg N, Xie X. Design of a live and maximally permissive Petri net controller using the theory of regions[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 2003, 19(1): 137-141.

[14] Moody J O, Antsaklis P J. Petri net supervisors for DES with uncontrollable and unobservable transitions[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(3): 462-476.

[15] Murata T. Petri nets: properties, analysis and application[J]. Proceedings of the IEEE, 1989, 77(4): 541-580.

[16] Valdes R A, Martinez A, Tamarit M. A branch & bound algorithm for cutting and packing irregularly shaped pieces[J]. International Journal of Production Economics, 2013, 145: 463-477.