

自动制造系统 Petri 网模型的资源变迁网性质分析

岳 昊

(漳州师范学院 计算机科学与工程系, 福建 漳州 363000)

摘 要: 资源变迁网 N_R 是自动制造系统 Petri 网模型 N 的简化形式, 在系统死锁的分析与控制中有重要作用. 文中总结了资源变迁网的若干性质, 并指出: 对于任意一个非空资源子集 R_1 , 若资源变迁网 N_R 关于 R_1 的内连子网 $N_1 = N_R[R_1 \cup (\cdot R_1 \cap R_1 \cdot)]$ 是强连通的, 则一定存在以 R_1 为资源集的资源变迁回路, 特别地, $\theta = \langle R_1, (\cdot R_1 \cap R_1 \cdot) \rangle$ 就是其中一个. 进一步, 若 θ 又满足完美条件, 则 θ 即为 N 的一个完美极大资源变迁回路.

关键词: Petri 网; 制造系统; 资源; 变迁

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)08-0230-05

Property Analysis of the Resource - Transition Net of Petri Net Models for Automated Manufacturing Systems

YUE Hao

(Department of Computer Science and Engineering, Zhangzhou Normal University, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: The resource - transition net (RTN) N_R is the reduction form of N , which is the Petri net model of an automated manufacturing system (AMS). Thus, N_R plays an important role in system deadlock analysis and control. After a couple of properties in resource - transition nets are summarized, conclusions are proposed as follows. If the inner sub-net N_1 on R_1 (where R_1 is an arbitrary resource subset) of the RTN N_R is strongly connected, there must be a resource - transition circuit (RTC) with R_1 as its resource set (such as $\theta = \langle R_1, (\cdot R_1 \cap R_1 \cdot) \rangle$). In addition, if θ satisfies the perfection condition, the RTC θ is a Perfect Maximal Resource - Transition Circuit (PMRTC) of N .

Key words: Petri net; manufacturing system; resource; transition

1 引言

在自动制造系统(automated manufacturing systems, AMS)中, 机器、缓冲缓冲器、机器人或自动导引小车(Automatic Guided Vehicle, AGV)等资源都是有限的. 对有限资源的竞争加上资源分配的不合理, 将会导致死锁的发生, 从而大大降低生产率^[1]. 目前, 为了解决 AMS 中的死锁问题, Petri 网这种形式化方法已经成为一种流行方法^[2].

在解决死锁的过程中, 一般的做法是: 先找出导致系统发生死锁的结构特征, 再根据某项原则加入控制库所和控制弧, 以完成对系统的控制. 死锁结构

特征的例子有: (1) 柔性制造系统 Petri 网模型 S^3PR 网中的严格极小信标^[3]和基本信标^[4]. (2) 带有共享资源的柔性制造系统 Petri 网模型 PPN 中的死锁结构(deadlock structure, DS)^[5]. (3) 多资源服务处理系统 Petri 网模型 SPN 中的循环结构^[5]. (4) 具有多资源需求和柔性路径的顺序资源分配系统 Petri 网模型 S^3PGR^2 网中的死标识信标^[6]. (5) 自动制造系统 Petri 网模型 SPN 中的完美极大资源变迁回路(Perfect Maximal Resource - Transition Circuit, PMRTC)^[7].

在以 PMRTC 为死锁结构特征的活性控制策略设计中, 自动制造系统 Petri 网模型的资源变迁网在

系统死锁的分析与控制中有重要作用^[8]. 文中总结了资源变迁网的若干性质,并指出:对于任意一个非空资源子集 R_1 ,存在以 R_1 为资源集的资源变迁回路的充分必要条件是,资源变迁网 N_R 关于 R_1 的内连子网 $N_1 = N_R[R_1 \cup (\cdot R_1 \cap R_1 \cdot)]$ 是强连通的. 进一步,若资源变迁回路 $\theta = \langle R_1, (\cdot R_1 \cap R_1 \cdot) \rangle$ 满足完美条件,则 θ 就是一个 PMRTC^[9].

2 基本概念与定义

Petri 网的基本概念和理论参见文献[10-12]. 对于文中出现的 Petri 网基本概念、术语和一些基本结论除非特别说明均沿用文献[12]的表述方法.

定义 1 $N = (P, T, F)$ 称为一个网,其中 P 和 T 为有限、非空且互不相交的集合, P 是库所的集合, T 是变迁的集合, $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 称为流关系或连接弧集合. N 亦称为一个 Petri 网基网. 定义 $\cdot x = \{y \in P \cup T / (y, x) \in F\}$ 为节点 $x \in P \cup T$ 的前集,而 $x \cdot = \{y \in P \cup T / (x, y) \in F\}$ 为节点 $x \in P \cup T$ 为节点的后集,一个集合的前集(后集)为它的所有元素的前集(后集)的并集^[12].

定义 2 设 $N = (P, T, F)$ 是一个网, $X \subseteq P \cup T$, N 的由 X 生成的子网是一个网,记为 $N[X] = (P_X, T_X, F_X)$,其中, $P_X = P \cap X$, $T_X = T \cap X$, $F_X = F \cap (X \times X)$ ^[7].

定义 3 设 $N = (P, T, F)$ 是一个网, $P_1 \subseteq P$, 则 N 的由 $P_1 \cup (P_1 \cdot \cap \cdot P_1)$ 生成的子网 N_1 ,即 $N_1 = N[P_1 \cup (P_1 \cdot \cap \cdot P_1)]$ 称为 N 网关于库所子集 P_1 的内连子网^[12].

Petri 网基网 $N = (P, T; F)$ 中的一条有向路径是由库所和变迁组成的一个串 $\alpha = x_1 x_2 \cdots x_k$, 其中 $x_i \in P \cup T$, $(x_i, x_{i+1}) \in F$, $i = 1, \cdots, k-1$. 如果 $x_1 = x_k$, $(k \geq 2)$, 称有向路径 α 为有向回路. 如果对于 $\forall x, y \in \{P \cup T\}$, $x \neq y$, 均有从 x 到 y 的有向路径, 则称 N 是强连通的.

文中研究对象为一类 S^3PR 网自动制造系统的 Petri 网模型, 有关 S^3PR 网的定义及性质详见文献[3].

定义 4 设 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 是一个 S^3PR 网, 其中, 称 P_S 中的库所为操作库所, P_0 中的库所为进程空闲库所, P_R 中的库所为资源库所(或称为资源)^[3].

由 S^3PR 网 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 的定义

可知, 对于 N 中的每一个变迁 t 而言, $\cdot t$ 中 $t \cdot$ 各仅有一个进程空闲库所或操作库所, 即 $|\cdot t \cap (P_S \cup P_0)| = |\cdot t \cap (P_S \cup P_0)| = 1$, 用 ${}^{(p)}t$ 和 $t^{(p)}$ 分别记 $\cdot t$ 中 $t \cdot$ 的那个进程空闲库所或操作库所, 对于 $T_1 \subseteq T$, 记号 ${}^{(p)}T_1$ 表示集合 $\{{}^{(p)}t / t \in T_1\}$.

定义 5 给定系统 Petri 网模型 S^3PR 网 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$, 设 θ 是 N 中的一条有向回路, 如果 θ 中仅包含变迁和资源库所结点, 则称 θ 为一个资源变迁回路(Resource - Transition Circuit, RTC). θ 是一个 RTC, 其中的资源库所集和变迁集分别记为 $R[\theta]$ 和 $T[\theta]$, θ 也称为资源集 $R[\theta]$ 的一个 RTC^[7].

定义 6 给定系统 Petri 网模型 S^3PR 网 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$, 设 R_1 是一个资源子集, 即 $R_1 \subseteq R$, 则记 $E(R_1)$ 为资源集 R_1 的所有 RTC 组成的集合. 设 $\theta_1, \theta_2 \in E(R_1)$, 即 θ_1 和 θ_2 是两个具有共同资源库所结点的 RTC, 则 $\theta_1 \leq \theta_2$ 是指 θ_2 包含 θ_1 , 即 θ_1 是 θ_2 的子回路; $\theta_1 \cup \theta_2$ 是指这两个有向回路的所有结点和弧组成的有向回路(由于 θ_1 和 θ_2 具有共同的资源库所结点, 所以 $\theta_1 \cup \theta_2$ 一定是一条有向回路). 对于一个资源集 $R_1 \subseteq R$, 若 $E(R_1)$ 非空, 则 $EE(R_1)$ 中有且仅有一个极大 RTC, 记为 θ_0 , 其中“极大”的意思是对于 $\forall \theta_1 \in E(R_1)$, 都有 $\theta_1 \leq \theta_0$ ^[7].

定义 7 系统 Petri 网模型 S^3PR 网 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$, θ 是 N 的一个 RTC, 如果 $({}^{(p)}T[\theta]) \cdot = T[\theta]$, 则称 θ 是完美的. 对于一个资源子集 $R_1 \subseteq P_R$, $\Pi(R_1)$ 表示以 R_1 为资源集的所有完美 RTC 的集合^[8].

定义 8 系统 Petri 网模型 S^3PR 网 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$, 设 $\theta_1, \theta_2 \in \Pi(R_1)$, 则 $\theta_1 \cup \theta_2 \in \Pi(R_1)$, 因此, 若 $\Pi(R_1)$ 非空, 则 $\Pi(R_1)$ 包含一个唯一的极大元, 称这个极大元为 N 的以 R_1 为资源集的完美极大 RTC (Perfect Maximal Resource - Transition Circuit, PMRTC), 记为 $\xi(R_1)$ ^[8].

定义 9 设 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 是一个 S^3PR 网, 则 N 的由 $P_R \cup (P_R \cdot \cap \cdot P_R)$ 生成的子网 $N[P_R \cup (P_R \cdot \cap \cdot P_R)]$ 称为 N 的资源变迁网, 记为 N_R ^[8].

3 资源变迁网性质分析

下面列举资源变迁网的 8 条性质, 由于文章篇

幅所限,加上对于这些性质的证明并不复杂,因而将证明过程略去。

性质 1 设 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 是一个 S^3PR 网, N_R 是 N 的资源变迁网,若 θ 是 N_R 中的一条有向回路,则 θ 是 N 的一个 RTC。

性质 2 设 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 是一个 S^3PR 网, N_R 是 N 的资源变迁网,若 θ 是 N 的一个 RTC,则 θ 是 N_R 中的一条有向回路。

根据性质 1 和性质 2,将 N_R 中的有向回路 θ 不加区别地称为 N_R 中的资源变迁回路。

性质 3 设 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 是一个 S^3PR 网, N_R 是 N 的资源变迁网,若变迁 t 是 N 的第一步操作工序变迁,则 t 不在 N_R 中;若变迁 t 是 N 的最后一步操作工序变迁,则 t 亦不在 N_R 中。

性质 4 设 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 是一个 S^3PR 网, N_R 是 N 的资源变迁网,则 N_R 的变迁数目 $|P_R \cap P_R| \leq |T| - 2|P_0|$ 。

性质 5 设 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 是一个 S^3PR 网, N_R 是 N 的资源变迁网, t 是 N_R 中的任意一个变迁(即 $\forall t \in (P_R \cap P_R)$),则在 N_R 中有 $|t| = |t'| = 1$ (即 t 的前集和后集均有且仅有一个元素)。

θ_1, θ_2 是 S^3PR 网 N 的两个 RTC,若 $R[\theta_1] = R[\theta_2], T[\theta_1] = T[\theta_2]$,则 θ_1 和 θ_2 将被不加区别地对待与使用。如性质 6 所述。

性质 6 一个 RTC 由其资源集和变迁集唯一确定。

根据性质 6,可以采用记号 $\theta = \langle R[\theta], T[\theta] \rangle$ 表示一个 RTC θ 。

性质 7 一个 S^3PR 网 N, N_R 是 N 的资源变迁网, N_1 是 N_R 的由资源子集 R_1 (R_1 非空) 和变迁子集 T_1 生成的子网,即 $N_1 = N_R[R_1 \cup T_1]$,其中 $R_1 \subseteq P_R, T_1 \subseteq (P_R \cap P_R)$,若 N_1 是强连通的,则存在 N_R 的资源变迁回路 θ ,使得 $R[\theta] = R_1, T[\theta] = T_1$ 。

性质 8 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 是一个 S^3PR 网, N_R 是 N 的资源变迁网, θ 是 N_R 的一条资源变迁回路,则 N_R 的由资源子集 $R[\theta]$ 和变迁子集 $T[\theta]$ 生成的子网(即 $N_R[R[\theta] \cup T[\theta]]$)是强连通的。

定理 1 设 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 是一个 S^3PR 网, N_R 是 N 的资源变迁网, R_1 是 N 的一个非空资源子集,即 $R_1 \subseteq P_R, N_1$ 是 N_R 的由 $R_1 \cup ($

$R_1 \cap R_1')$ 生成的子网,则 N_1 是强连通的,当且仅当 $E(R_1)$ 非空(即资源子集 R_1 的所有 RTC 组成的集合非空)。

证明: $(\Rightarrow)$ 已知 N_1 是强连通的,由性质 7 知存在 N_R 的资源变迁回路 $\theta = \langle R_1, (R_1 \cap R_1') \rangle$, R_1 非空,则 $E(R_1)$ 中至少包含这条 RTC, $E(R_1)$ 非空。

$(\Leftarrow)$ 已知 $E(R_1)$ 非空,可任取 $\theta \in E(R_1)$,不妨设 $\theta = \langle R_1, T_1 \rangle$,其中 $T_1 = T[\theta]$,则一方面,由性质 8 知 $N_R[R_1 \cup T_1]$ 是强连通的。另一方面,有 $T_1 \subseteq (R_1 \cap R_1')$,事实上,对于 $\forall t \in T_1$,由 t 在 RTC 之上,可知 $\exists r_1, r_2 \in R_1$,使得 $t \in r_1'$,且 $t \in r_2$,因此 $t \in (R_1 \cap R_1')$, $T_1 \subseteq (R_1 \cap R_1')$ 。综合以上两方面可知 N_R 的由 $R_1 \cup (R_1 \cap R_1')$ 生成的子网 N_1 是强连通的。

给定一个非空资源子集 $R_1 \subseteq P_R$,可以通过定理 1 判定是否存在以 R_1 为资源集的 RTC。

定义 10 设 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 是一个 S^3PR 网,称 $(P_0)'$ 中的变迁为 N 的第一步操作工序变迁,称 (P^0) 中的变迁为 N 的最后一步操作工序变迁。

例如后文图 1 中的变迁 t_1, t_5, t_{15} 均为第一步操作工序变迁, t_4, t_{10}, t_{20} 均为最后一步操作工序变迁。

定义 11 设 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 是一个 S^3PR 网,集合 $P_{\Pi} = \{p \in P_s / |p'| > 1\}$ 称为分叉操作库所集,其中的元素称为分叉操作库所^[8]。

例如图 1 中的库所 p_7 就是一个分叉操作库所。

定义 12 θ 是 N 的一个 RTC,若对于 $\forall p \in P_{\Pi}$,有 $(p' \cap T[\theta] \neq \emptyset) \rightarrow (p' \subseteq T[\theta])$ 其中符号“ $\rightarrow$ ”表示蕴含,则称 θ 满足完美条件^[8]。

引理 1 θ 是 N 的一个 RTC,则 θ 满足完美条件,当且仅当 θ 是完美的^[8]。

证明:根据定义 7 和定义 12 易知。

定理 2 给定一个 S^3PR 网 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$, N_R 是 N 的资源变迁网,非空资源子集 $R_1 \subseteq P_R, N_1$ 是 N_R 关于 R_1 的内连子网,即 $N_1 = N_R[R_1 \cup (R_1 \cap R_1')]$,若 $N_1 = (R_1, T_1, F_1)$ 是强连通的,且资源变迁回路 $\theta = \langle R_1, T_1 \rangle$ 满足完美条件,则 $\theta = \langle R_1, T_1 \rangle$ 就是 N 的一个完美极大 RTC,即 $\theta = \langle R_1, T_1 \rangle = \xi(R_1)$,其中 $T_1 = (R_1 \cap R_1')$ 。

证明:由 N_1 是强连通的,根据性质 7 知 $\theta = \langle R_1, T_1 \rangle$ 确为一个 RTC,由 $\theta = \langle R_1, T_1 \rangle$ 满足完美条件,根据引理 1 知 $\theta = \langle R_1, T_1 \rangle$ 是完美的,又由 $T_1 = (\cdot R_1 \cap R_1 \cdot)$,知 $\langle R_1, T_1 \rangle$ 是 $E(R_1)$ 中的极大元素.因此 $\theta = \langle R_1, T_1 \rangle$ 就是 N 的一个完美极大 RTC,即 $\theta = \langle R_1, T_1 \rangle = \xi(R_1)$.

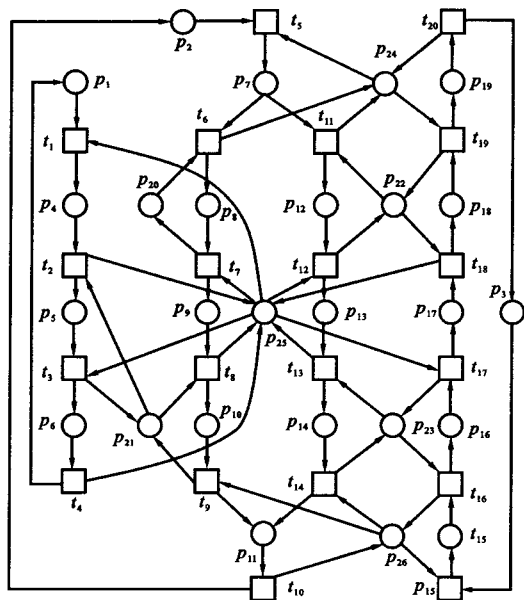


图 1 一个 S^3PR 网 N (取自文献[8])

4 举例

图 1 所示的 S^3PR 网 $N = (P_S \cup P_0 \cup P_R, T, F)$ 的资源变迁网 N_R 如图 2 所示.考查 N_R :

(1) 取非空资源子集 $R_1 = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\} = P_R$, N_R 的由 $R_1 \cup (\cdot R_1 \cap R_1 \cdot)$ 生成的子网 N_1 即为 N_R , 是强连通的, 因此根据定理 1 的必要条件知 $E(R_1)$ 非空. 进一步, 由于资源变迁回路 $\theta = \langle R_1, T_1 \rangle$ (其中 $T_1 = (\cdot R_1 \cap R_1 \cdot)$) 满足完美条件, 因而根据定理 2 知 θ 即为 N 的以 R_1 为资源集的完美极大资源变迁回路.

(2) 取非空资源子集 $R_1 = \{3, 5\}$, N_R 的由 $R_1 \cup (\cdot R_1 \cap R_1 \cdot)$ 生成的子网如图 3 所示, 是强连通的, 因此根据定理 1 的必要条件知 $E(R_1)$ 非空. 进一步, 由于资源变迁回路 $\theta = \langle R_1, T_1 \rangle$ (其中 $T_1 = (\cdot R_1 \cap R_1 \cdot)$) 不满足完美条件, 因而无法应用定理 2.

(3) 取非空资源子集 $R_1 = \{4, 5, 6, 7\}$, N_R 的由 $R_1 \cup (\cdot R_1 \cap R_1 \cdot)$ 生成的子网如图 4 所示, 不是强连通的, 因此根据定理 1 知 $E(R_1)$ 为空, 即不存在

以 R_1 为资源集的 RTC.

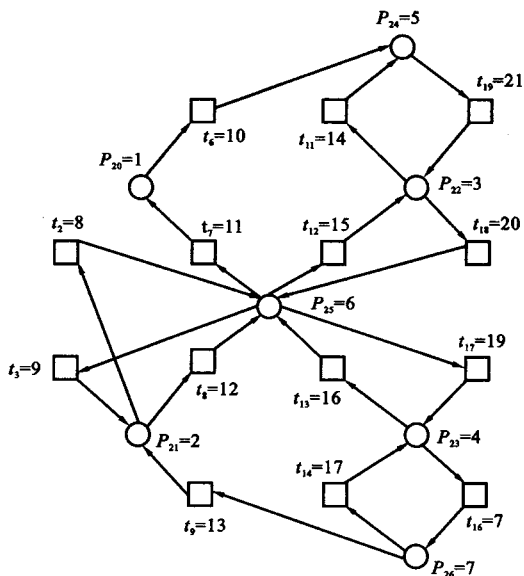


图 2 图 1 中 S^3PR 网 N 的资源变迁网 N_R

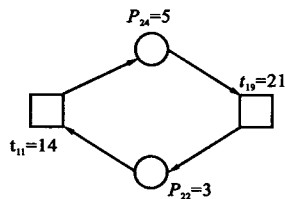


图 3 资源变迁网 N_R 关于资源子集 $\{3, 5\}$ 的内连子网

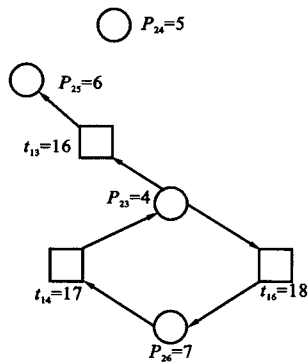


图 4 资源变迁网 N_R 关于资源子集 $\{4, 5, 6, 7\}$ 的内连子网

5 结束语

在基于 Petri 网这种形式化方法解决自动制造系统死锁问题的研究中, 可以选择以完美极大资源变迁回路 (PMRTC) 作为系统的死锁结构特征. 资源变迁网是自动制造系统 Petri 网模型的简化形式, 因此, 资源变迁网在系统死锁的分析与控制中有重要作用. 文中总结了资源变迁网的若干性质, 对于任

意一个资源子集 R_1 , 给出一个判定存在以 R_1 为资源集的资源变迁回路的充分必要条件. 最后, 若资源变迁回路 $\theta = \langle R_1, (\cdot R_1 \cap R_1') \rangle$ 满足完美条件, 则 θ 即为 N 的以 R_1 为资源集的完美极大资源变迁回路.

参考文献:

- [1] 王安荣, 李志武. 基本信标计算的一种快速算法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2008, 35(4): 632 - 638.
- [2] Li Z W, Zhou M C, Wu N Q. A survey and comparison of petri net - based deadlock prevention policies for flexible manufacturing systems[J]. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C. Applications and Reviews, 2008, 38(2): 173 - 188.
- [3] Ezpeleta J, Colom J M, Martinez J. A petri net based deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems[J]. IEEE Trans. Robot. Automat., 1995(11): 173 - 184.
- [4] Li Z W, Zhou M C. Elementary siphons of petri nets and their application to deadlock prevention in flexible manufacturing systems[J]. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A. Syst., Humans, 2004, 34(1): 38 - 51.
- [5] 刑科义, 许宏斌, 胡保生. 多资源服务处理系统的活性控制策略[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(12): 2096 - 2102.
- [6] Park J, Reveliotis S A. Deadlock avoidance in sequential resource allocation systems with multiple resource acquisitions and flexible routings[J]. IEEE Trans. Automat. Contr., 2001(46): 1572 - 1583.
- [7] Xing K Y, Tian F, Yang X J. Optimal deadlock avoidance Petri net supervisors for automated manufacturing systems[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2007, 5(2): 152 - 158.
- [8] Xing K, Zhou M, Shi K, et al. Enumeration algorithms for maximal perfect - resource - transition circuits and strict minimal siphons in S3PR[C]// Proc. 17th IFAC World Congr. Seoul, Korea, 2008: 14490 - 14495.
- [9] Keyi Xing, Meng Chu Zhou, Huixia Liu, et al. Optimal petri - net - based polynomial - complexity deadlock - avoidance policies for automated manufacturing systems[J]. Systems, Man and Cybernetics, Part A, IEEE Transactions on, 2009, 39(1): 188 - 199.
- [10] Murata T. Petri nets: properties, analysis and application[J]. IEEE, 1989, 77(4): 541 - 579.
- [11] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [12] 吴哲辉. Petri 网导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.

作者简介:

岳 昊 男, (1980 -), 博士, 讲师. 研究方向为制造系统控制与优化调度 Petri 网理论及应用.

(上接第 229 页)

参考文献:

- [1] Heinzelman W B. An application - specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on wireless communications, 2002(1): 660 - 670.
- [2] Georgios Smaragdakis, Ibrahim Matta, Azer Bestavros. SEP: a stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[C]// Second International Workshop on Sensor and Actor Network Protocols and Applications. Sanpa, 2004.
- [3] Yao Lan, Cui Xiuli, Wang Meng. An energy - balanced clustering routing algorithm for wireless sensor networks [C]// World Congress on Computer Science and Information Engineering. Washington, DC, 2009: 316 - 320.
- [4] Rui Hou, Weizheng Ren, Yaodong Zhang. A wireless sensor network clustering algorithm based on energy and distance[C]// 2009 Second International Workshop on Computer Science and Engineering. IWCSE, 2009(1): 439 - 442.
- [5] Wu Y, Fahmy S. Optimal sleep/wake scheduling for time - synchronized sensor networks with qos guarantees[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(5): 1508 - 1521.

作者简介:

王慧斌 男, (1967 -), 博士, 副教授. 研究方向为信号与信息处理技术、图像信息获取与多媒体通信、信息系统分析与集成.