

文章编号: 1001-0920(2009)12-1831-05

基于资源配置混杂 Petri 网的混杂系统生产过程建模

杨欣¹, 杨蒲¹, 费树岷²

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016; 2. 东南大学 自动化学院, 南京 210096)

摘要: 为了增强混杂 Petri 网解决资源共享和资源冲突的能力, 定义一种新的混杂 Petri 网模型——资源配置混杂 Petri 网, 提出了相应的使能和激发规则. 将对连续变迁和离散变迁的控制作用引入混杂 Petri 网, 同时, 增加了资源配置变迁和资源释放变迁, 用于有效分配可重复利用的资源. 以典型的混杂生产过程为例, 研究混杂系统生产过程建模. 研究表明, 所定义的模型描述能力强, 模型语义正确合理, 能够有效描述和分析混杂系统生产过程.

关键词: 混杂 Petri 网; 混杂系统; 建模; 资源配置混杂 Petri 网

中图分类号: TP11

文献标识码: A

Modeling for hybrid system based on resource distribution hybrid Petri nets

YANG Xin¹, YANG Pu¹, FEI Shu-min²

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China. Correspondent: YANG Xin, E-mail: yangxin@nuaa.edu.cn)

Abstract: In order to enhance the ability of hybrid Petri nets for solving resource sharing and conflict, a new extended Petri net model, resource distribution hybrid Petri net (RDHPN), is defined. The enabling and firing semantics of transitions of the RDHPNs are discussed. The control of continuous transitions and discrete transitions is introduced to hybrid Petri nets, and resources assignment transitions and resources releasing transitions are added, which can assign reusable resources. An application example of typical hybrid system shows the describing ability of the model is well and the meaning is reasonable, which can describe and analyse the producing process of the hybrid systems.

Key words: Hybrid Petri net; Hybrid systems; Modeling; Resource distribution hybrid Petri nets

1 引言

近年来, 随着对离散事件动态系统研究的深入, 人们开始认识到一种由离散事件与连续系统交互作用的一类混杂系统问题的重要性和挑战性. 目前, 国内外在混杂企业生产计划与调度建模方面已经做了初步研究, 主要采用的方法有: 数学规划方法^[1]、启发式方法^[2]、基于逻辑的方法^[3]、基于事件触发的动态调度方法^[4]和基于 Petri 网(PNs)的方法^[5,6]等, 其中最为广泛的是基于 Petri 网的方法. Bareduan 等^[5]研究了 Petri 网在协同设计和协同制造建模和调度中的应用. Gradisar 等^[6]采用赋时 Petri 网结合现有生产数据对生产系统进行建模.

由于流程工业生产过程的混杂特性, 混杂 Petri

网描述形式的仿真方法逐渐成为一种趋势. 混杂 Petri 网最初是由 Bail^[7]提出的, 它由离散 Petri 网和连续 Petri 网组成. Amrah 等^[8]利用连续 Petri 网实现了一类离散事件系统和制造系统的控制. Audy 等^[9]用间歇 Petri 网解决了高输出生产线的建模与控制. Flaus 等^[10]基于混杂流网给出了一类混杂过程的优化控制方法. Balduzzy^[11]则通过一阶混杂 Petri 网对柔性制造系统进行建模, 同时结合线性规划方法和模型行为演变, 给出了柔性制造系统的局部优化控制方法. Hanisch^[12]通过高级 Petri 网实现了柔性间歇生产资源分配. 廖伟志等^[13]定义了广义混杂 Petri 网, 同时结合模型行为演变和线性规划实现了混杂系统的优化控制.

收稿日期: 2009-04-02; 修回日期: 2009-05-19.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60835001).

作者简介: 杨欣(1978—), 男, 江苏镇江人, 讲师, 博士, 从事 Petri 网、大系统建模的研究; 费树岷(1961—), 男, 安徽宣城人, 教授, 博士生导师, 从事非线性控制、复杂系统优化与控制等研究.

基于混杂 Petri 网模型混杂系统优化控制的研究结果仅仅是初步的. 如何对实际问题建立适当的模型, 以及如何对实际过程设计切实可行的最优或次优的混杂控制方案, 仍然是理论研究和实际应用中急需解决且极具挑战性的问题.

本文从混杂 Petri 网入手, 定义了一种新的资源配置混杂 Petri 网模型, 提出了明确的模型语义, 并给出了基于资源配置混杂 Petri 网的混杂系统生产过程模型的建立.

2 资源配置混杂 Petri 网模型

2.1 资源配置混杂 Petri 网的定义

资源配置混杂 Petri 网模型为一个八元组

$$N = (P, T, A, W_I, W_O, h, \tau, v).$$

其中: P 为有限库所集; T 为有限变迁集, 且满足 $P \cap T = \emptyset$; A 为有向弧集合; W_I 和 W_O 表示前向/后向关联函数; $h: P \cup T \rightarrow \{C, D\}$ 用于指示库所和变迁是离散的(用 D 表示)还是连续的(用 C 表示); τ 为变迁激发的时延; v 为表示连续变迁的激发速度.

下面对以上变量作详细说明:

1) $P = P_d \cup P_c \cup P_{ad} \cup P_{ac} \cup P_E$ 是 m 个库所的集合, 它由 5 部分组成: 离散库所 P_d , 连续库所 P_c , 离散控制库所 P_{ad} , 连续控制库所 P_{ac} 和事件输出库所 P_E . 具体表示见图 1.



图 1 库所表示方法

2) $T = T_d \cup T_c \cup T_{sn} \cup T_{cd} \cup T_{rd} \cup T_{rr}$ 是 n 个变迁的集合, 它由 6 部分组成: 离散变迁 T_d , 连续变迁 T_c , 同步变迁 T_{sn} , 连续离散转换变迁 T_{cd} , 资源配置变迁 T_{rd} 和资源释放变迁 T_{rr} . 具体表示见图 2. 其中: $T_d = T_l \cup T_s$ 是离散变迁的集合, T_l 是固定时延离散变迁, T_s 是随机时延离散变迁; T_{rd} 和 T_{rr} 用来控制资源在发生冲突时的资源分配和释放情况.

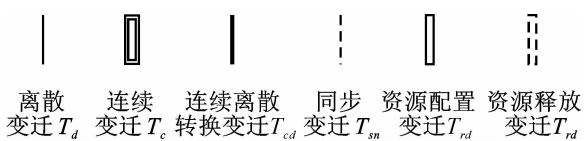


图 2 变迁表示方法

$$3) \quad W_I: \begin{cases} P_d \times T \rightarrow \mathbf{N}, \\ P_{ad} \times T \rightarrow \{0, 1\}, \\ P_{ac} \times T \rightarrow \{0, 1\}, \\ P_E \times T \rightarrow \{0, 1\}, \\ P_c \times T \rightarrow \mathbf{R}_0^+ \end{cases}$$

为前向关联函数, 表示输入库所与变迁之间的有向弧权重;

$$W_O: \begin{cases} P_d \times T \rightarrow \mathbf{N}, \\ P_{ad} \times T \rightarrow \{0, 1\}, \\ P_{ac} \times T \rightarrow \{0, 1\}, \\ P_E \times T \rightarrow \{0, 1\}, \\ P_c \times T \rightarrow \mathbf{R}_0^+ \end{cases}$$

为后向关联函数, 表示变迁与输出库所之间的有向弧权重.

Post 为输出关联映射, 若 $h(P) = D$, 则 $\text{Post}: P \cup T \rightarrow$ 正整数集合; 若 $h(P) = C$, 则 $\text{Post}: P \cup T \rightarrow$ 正实数集合.

4) $A = \{(P \times T) \cup (T \times P)\}$ 是库所和变迁之间的有向弧集合, 表示变迁和库所之间的联系. 模型中有向弧分为: 普通弧、使能弧、抑制弧和控制弧, 如图 3 所示.



图 3 有向弧表示

5) τ 表示变迁激发的时延. 对于固定时延离散变迁 ($t_j \in T_l$), 其固定激发延迟 $\delta_j = \tau(t_j)$, 一般情况下 $\tau(t_j)$ 默认为零. 令随机时延离散变迁的平均激发速度 $\lambda_i = \tau(t_i)$, 则平均激发延迟为 $1/\lambda_i$.

6) v 为连续变迁的激发速度函数, 在固定时间段内, 对 $t_i \in T_c, v(t_i) = v_i$ 均为常数, $0 \leq V_{\min} \leq v_i \leq V_{\max}$, 即所有连续变迁是匀速激发的. V_{\min} 和 V_{\max} 分别表示最小和最大激发速度.

2.2 资源配置混杂 Petri 网使能和激发规则

首先给出资源配置混杂 Petri 网的标识定义.

定义 1 资源配置混杂 Petri 网的标识为

$$m: \begin{cases} \text{type}(P_i) = P_d, m \rightarrow \mathbf{N}; \\ \text{type}(P_i) = P_{ad}, m \rightarrow \{0, 1\}; \\ \text{type}(P_i) = P_E, m \rightarrow \{0, 1\}; \\ \text{type}(P_i) = P_c, m \rightarrow \mathbf{R}_0^+; \\ \text{type}(P_i) = P_{ac}, m \rightarrow \mathbf{R}_0^+ \end{cases}$$

是一个函数. 其中: $\text{type}(P_i)$ 表示库所的类型, m_p 表示库所的标识. 离散库所中的标识为自然数, 离散控制库所和事件输出库所中的标识为 0 或 1, 连续库所和连续控制库所中的标识为非负实数. 在时刻 t , 系统的标识记为 $m(t)$, 初始标识记为 $m(\tau_0)$. 对于任意连续库所 $p_{ci} \in P_c$ 都有实数 M_{\min} 和 M_{\max} , 使得 $M_{\min} \leq m_{p_{ci}} \leq M_{\max}$ 始终满足. M_{\min} 和 M_{\max} 分别称为 p_{ci} 的标识上限和下限.

由于资源配置混杂 Petri 网中定义了多种库所、变迁和有向弧, 变迁的使能和激发规则与其他 Petri

网有所不同。

变迁的使能条件主要为库所使能，即当变迁输入库所集中的每一个库所均满足相应的标识要求或状态时，该变迁是使能的。变迁对输入库所中标识的要求，根据库所类型和与之相连的有向弧的类型不同而有所不同。

定义 2 资源配置混杂 Petri 网中，对于离散变迁 t_d ，如果所有 $p_d \in \cdot t_d$ ，有 $m_{p_d} \geq W_I(p_d, t_d)$ ，则称离散变迁 t_d 在标识 m 下是使能的。使能的变迁 t_l 在经过时间延迟 τ 后激发。

定义 3 资源配置混杂 Petri 网中，对于连续离散转换变迁 t_{cd} ，如果所有 $p_c \in \cdot t_{cd}$ ，有 $m_{p_c} \geq W_I(p_c, t_{cd})$ ，且两者之间为使能弧，则称 t_{cd} 在标识 m 下是使能的。如果所有 $p_c \in \cdot t_{cd}$ ，有 $m_{p_c} \leq W_I(p_c, t_{cd})$ ，且两者之间为抑制弧，则称 t_{cd} 在标识 m 下是使能的。使能的变迁 t_{cd} 立即激发。

定义 4 资源配置混杂 Petri 网中，同步变迁 t_{sn} 使得事件输出库所中的标识与离散输入库所中的标识同步，因此 t_{sn} 始终是使能的；只要离散输入库所中的标识发生变化时， t_{sn} 激发，事件输出库所中的标识将发生同样的变化。

定义 5 资源配置混杂 Petri 网中，资源配置变迁 t_{rd} 用于解决资源冲突或资源瓶颈，对于 $p \in \cdot t_{rd}$ ，如果有 $m_p \geq W_I(p, t_{rd})$ ，则称资源配置变迁 t_{rd} 在标识 m 下是使能的。

定义 6 资源配置混杂 Petri 网中，资源释放变迁 t_{rr} 用于释放资源，如果资源是可循环的，则对于 $p \in \cdot t_{rr}$ ， $p \in t_{rr}$ ，如果资源配置变迁 t_{rd} 在标识 m 下是使能的，则称 t_{rr} 在下一个标识中是使能的。

定义 7 资源配置混杂 Petri 网中，对于连续变迁 t_c ，当所有离散库所 $p_d \in \cdot t_c$ ， $m_{p_d} \geq W_I(p_d, t_c)$ 时，若所有连续库所 $p_c \in \cdot t_c$ ， $m_{p_c} \geq 0$ ，则称连续变迁 t_c 使能。

如果连续库所 $p_c \in \cdot t_c$ ， $m_{p_c} > 0$ ，则称连续变迁 t_c 在标识 m 下强使能；若 $m_{p_c} = 0$ ，则称连续变迁 t_c 在标识 m 下弱使能。

定义 8 若离散库所 p_d 和连续变迁 t_c 构成一个环，即 $t_c \in \cdot p_d \cap p_d$ ，则离散库所 p_d 对连续变迁 t_c 的激发是必要的，但不是消耗性的。

定义 9 在 t 时刻，连续变迁 t_{cj} 的瞬时激发速度 v_j 为

$$v_j \begin{cases} = 0, & t_{cj} \text{ 不使能;} \\ \in [V_{jmin}, V_{jmax}], & t_{cj} \text{ 强使能;} \\ \in [V_{jmin}, \bar{V}_j], \bar{V}_j \leq V_{jmax}, & t_{cj} \text{ 弱使能.} \end{cases}$$

3 基于资源配置混杂 Petri 网的混杂生产过程建模

3.1 资源配置混杂 Petri 网模型的构造算法

输入：混杂生产过程的简易模型；

输出：混杂生产过程资源配置混杂 Petri 网模型。

Step1：对于离散生产过程，定义离散库所和离散变迁。离散库所用来表示生产装置的运行状态，并利用离散控制库所使得离散变迁是受控激发的；对离散变迁的控制，用来表示对生产装置的启停控制。

Step2：对于连续生产过程，定义连续库所和连续变迁。连续库所用来对存储装置建模，并利用连续控制库所使得连续变迁是受控激发的；对连续变迁的控制，用来表示对生产装置瞬时加工量的调整。

Step3：定义使能弧和抑制弧不断监控连续库所中的标识，当标识达到一定数量时，就激发与之相连的连续离散转换变迁，通过连接使能弧和抑制弧实现对储罐液位的监控。一旦液位达到储量上限或下限，就触发相应的变迁，调用相应的处理机制。

Step4：定义同步变迁，实现对离散库所的实时监控，将装置的停机、开机等离散事件及时反映给调度模型，根据具体事件寻找最优的调度方案，实现基于事件触发的动态调度。

Step5：定义资源配置变迁和资源释放变迁，以体现混杂系统中生产过程的资源平衡关系，解决离散生产过程和连续生产过程的资源冲突和资源瓶颈问题。

3.2 实例

对于混杂生产过程而言，整个生产过程是在生产装置、存储装置及管线内进行。生产装置主要包括合成、分离等装置；存储装置主要包括存储各种原料、中间产品和最终产品的储罐。离散过程主要体现在对生产装置和存储装置的控制。

一个典型的混杂生产过程如图 4 所示。它包括 5 种生产装置，4 种中间存储装置，3 种原材料和 2 种最终产品。其中原料 2 是可循环资源。

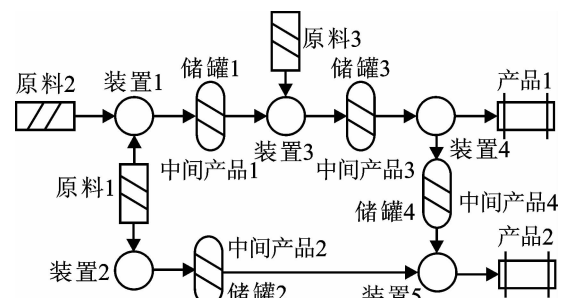


图 4 典型混杂生产过程

3.3 资源配置混杂 Petri 网模型的建立

上述生产过程的资源配置混杂 Petri 网模型如图 5 所示. 图中各个连续变迁输入弧上的权重用来表示同一台生产装置所需要的不同原材料的比例, 或同一种原材料在不同生产装置间分配的比例; 输出弧上的权重代表生产装置的各种产品的收率. 连续变迁 $t_{ac1}, t_{ac2}, t_{ac3}, t_{ac4}$ 和 t_{ac5} 分别代表生产装置 1, 2, 3, 4 和 5. 连续库所 p_{c1}, p_{c2} 和 p_{c4} 分别代表原材料

1, 2 和 3, 并且假设原材料能够满足生产需要. p_{c7} 和 p_{c9} 分别代表最终产品 1 和 2. 连续库所 $p_{c3}, p_{c5}, p_{c6}, p_{c8}$ 分别代表存储装置 1, 2, 3 和 4, 其最初存储量分别为 m_{30}, m_{50}, m_{60} 和 m_{80} , 存储容量的下限和上限表示为 $M_{imin}(i = 3, 5, 6, 8)$ 和 $M_{imax}(i = 3, 5, 6, 8)$. 变迁 t_{d1} 表示原料 2 在装置 1 和装置 2 之间的资源配置; 变迁 t_{rr1} 和 t_{rr2} 表示对可循环资源(原料 2)的释放.

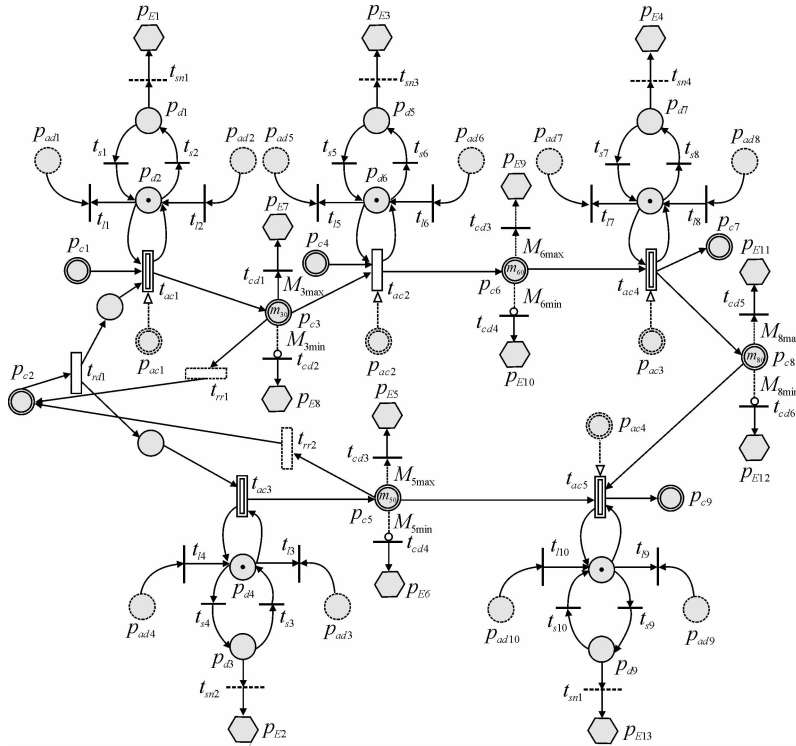


图 5 资源配置混杂 Petri 网模型

3.4 混杂生产过程的调度问题

混杂过程与其他工业过程相比,除了具有不确定性、非线性以及多资源相互协调等多种特性之外,还具有连续、平稳、高能耗和装置众多且复杂等突出特点. 生产调度就是要针对装置实际生产状态,解决不同生产装置之间、生产装置与存储装置之间的平衡,使得整个生产过程能够长期、稳定、优质地运行下去.

本文所定义的资源配置混杂 Petri 网模型,在调度问题上提供了两大优点:

1) 资源配置混杂 Petri 网中的离散变量和连续变量都受到控制,当有突发事件发生时,资源配置混杂 Petri 网通过事件输出库所产生离散标识,并在相应的离散控制库所中产生离散标识,实现对离散变迁的控制;

2) 资源配置混杂 Petri 网中,在资源发生冲突或出现资源瓶颈时,资源配置变迁和资源释放变迁可用于合理安排资源.

4 结 论

与已有的混杂 Petri 网模型相比,本文所定义的资源配置混杂 Petri 网模型语义更复杂、描述能力更强,能有效地描述和分析复杂混杂系统,并为后期混杂系统调度方面的研究打下了坚实的基础. 然而,资源配置混杂 Petri 网的理论和应用,尤其在全局最优化调度问题上,仍有待于进一步研究.

参考文献(References)

[1] Mendez C A, Henning G P, Cerda J. Optimal scheduling of batch plants satisfying multiple product orders with different due-dates [J]. Computers and Chemical Engineering, 2000, 24(10): 2223-2245.

[2] Sun Ronglei, Ding Han, Xiong Youlun, et al. Iterative learning scheduling: A combination of optimization and dispatching rules [J]. J of Manufacturing Technology Management, 2004, 15(3): 298-305.

[3] Hooker J N, Osorio M A. Mixed logical/linear programming [J]. Discrete Applied Mathematics, 1999, 96(15): 395-442.

- [4] 梁峰, 江志斌, 陶俐言, 等. 基于事件驱动的制造资源冲突实时消解方法[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(2): 356-362.
(Liang F, Jiang Z B, Tao L Y, et al. Real-time manufacturing resource conflict resolution based on event-driven mechanism [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(2): 356-362.)
- [5] Bareduan Salleh Ahmad, Hasan Sulaiman Hj, Ariffin Saparudin. Finite scheduling of collaborative design and manufacturing activity: A Petri net approach[J]. J of Manufacturing Technology Management, 2008, 19(2): 274-288.
- [6] Gradisar D, Music G. Production-process modeling based on production-management data: A Petri-net approach [J]. Int J of Computer Integrated Manufacturing, 2007, 20(8): 794-810.
- [7] Bail J L, Alla H, David R. Hybrid Petri nets[C]. Proc of 1th European Control Conf. Grenoble, 1991: 1472-1477.
- [8] Amrah A, Zethouni N. On the control of manufacturing lines modeled by controlled continuous Petri nets[J]. J of Systems Science, 1998, 29(2): 127-137.
- [9] Audry N, Demongodin I. Modeling and control of high throughput production lines [C]. Proc of the IFAC Workshop on New Trends in Design of Control Systems. Smolenice, 1994: 392-397.
- [10] Flaus J M. Hybrid supervisor synthesis for a class of hybrid systems[C]. Proc of on Automation of Mixed Processes. Reims, 1998: 185-192.
- [11] Balduzzi F, Giua A. Modeling manufacturing systems with first-order hybrid Petri nets [J]. Production Research, Special Issue on Modeling, Specification and Analysis of Manufacturing Systems, 2001, 39(2): 255-282.
- [12] Hanisch H M, Fleck S. A resource allocation scheme for flexible batch plants based on high-level Petri nets [C]. Proc of CESA'96, Symp on Discrete Events and Manufacturing Systems. Lille, 1996: 303-308.
- [13] 廖志伟, 古天龙. 基于一种新型混杂 Petri 网的混杂系统建模与控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(4): 762-769.
(Liao Z W, Gu T L. Modeling and control for hybrid system based on general hybrid Petri nets[J]. Control and Decision, 2007, 22(4): 762-769.)

~~~~~

(上接第 1830 页)

- [3] Tang L, Liu J, Rong A, et al. An effective heuristic algorithm to minimise stack shuffles in selecting steel slabs from the slab yard for heating and rolling[J]. J of the Operational Research Society, 2001, 52(10): 1091-1097.
- [4] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production [J]. European J of Operational Research, 2001, 133(3): 1-20.
- [5] Lixin Tang, Jiyin Liu, Aiyong Rong, et al. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan iron & steel complex [J]. European J of Operational Research, 2000, 124(2): 267-282.
- [6] Graham R. Bounds for certain multiprocessing anomalies [J]. Bell System Technology Journal, 1966, 45(2): 1563-1581.
- [7] Potts C N, Kovalyov M Y. Scheduling with batching: A review[J]. European J of Operational Research, 2000, 120(3): 228-249.
- [8] Mikhail A Kubzin, Vitaly A Strusevich. Two-machine flow shop no-wait scheduling with a nonavailability interval[J]. Naval Research Logistics, 2004, 51(4): 613-632.
- [9] Celia A Glass, Hans Kellerer. Parallel machine scheduling with job assignment restrictions[J]. Naval Research Logistics, 2007, 54(10): 250-258.
- [10] Xiuli Wang, Edwin Cheng T C. Machine scheduling with an availability constraint and job delivery coordination[J]. Naval Research Logistics, 2007, 54(10): 11-21.
- [11] Changjun Wang, Yugeng Xi. Performance analysis of active schedules in identical parallel machine[J]. J of Control Theory and Applications, 2007, 5(3): 239-243.