

文章编号: 1001-0920(2004)11-1275-03

## 变计时过程/变迁网模型及其应用研究

李彦平, 李雪飞, 万福才, 原忠虎  
(沈阳大学 信息工程学院, 辽宁 沈阳 110044)

**摘要:** 基于过程运行的离散标识(逻辑变量)和剩余时间连续标识(时间变量), 提出一种新的混合标识过程/变迁网——变计时过程/变迁网模型。基于该模型, 混杂动力学系统离散事件的实时监控、连续子过程的实时调度等问题可得到有效解决。

**关键词:** 变计时过程/变迁网; 混杂动力学系统; 实时监控; 实时调度; 过程控制

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Research on time-varied process/transition Petri net and its applications

LI Yan-ping, LI Xue-fei, WAN Fu-cai, YUAN Zhong-hu

(College of Information Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China. Correspondent: LI Yan-ping, E-mail: liyp988@sina.com)

**Abstract:** Based on process running discrete mark (logic variables) and process running remanent time (time variables), a new model of process/transition Petri nets with mixed mark, named time-varied process/transition Petri nets, is proposed. Many problems of hybrid dynamics systems, such as the integrated modeling of continuous sub-processes, the coupling and joining between discrete variables and continuous states, the real-time supervisory control of discrete events, the real-time scheduling of continuous sub-processes, etc. can be solved effectively with this model.

**Key words:** time-varied process/transition Petri net; hybrid dynamics system; real-time supervisory control; real-time scheduling; process control

### 1 引言

一个复杂的混杂动力学系统通常由多个连续子过程(连续变量动态系统CVDS)组成, 连续子过程的运行受到自身控制的影响, 它们之间在离散事件驱动下还将形成复杂的顺序或并发关系。从宏观上看, 系统中子过程运行和离散事件的演化是一个典型的离散事件动态系统(DED S)。目前, 对于这类系统的研究所依据的模型有两种, 即关系模型和层次模型。它们大都局限于线性混杂系统范围<sup>[2]</sup>。关系模

型侧重于同一层面上表现连续变量(过程变量)与离散变量(运行标志)间的耦合关系; 而层次模型则侧重表现DED S与多个CVDS的上下从属关系。无论采用哪种模型, 关键在于如何解决系统内部离散变量与连续变量之间耦合与衔接问题, 但该问题至今尚未得到满意的解决<sup>[1,2]</sup>。

本文通过引入子过程运行剩余时间这一特定连续标识, 提出一种新的混合标识过程/变迁网——变计时过程/变迁网模型。在此模型中, 连续标识采用

收稿日期: 2004-01-04; 修回日期: 2004-09-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60274027)。

作者简介: 李彦平(1957—), 男, 辽宁锦州人, 教授, 博士, 从事复杂工业过程建模、混杂系统理论及应用的研究; 李雪飞(1971—), 女, 辽宁沈阳人, 讲师, 硕士, 从事Petri网理论及应用的研究。

一种变计时的概念,以表征子过程当前所处的运行“状态”.该模型通过引入特定的连续标识将底层子过程模型有机地集成衔接起来,既考虑了子过程间的逻辑关系,又考虑了它的运行剩余时间(子过程至结束所需的最小时间).由此可有效地解决复杂混杂动力学系统子过程的模型集成、过程控制、实时监控与实时调度等一系列问题

## 2 变计时过程/变迁网

一类混杂动力学系统可用如下变计时过程/变迁网来描述:

**定义 1** 称如下 7 元组为变计时过程/变迁网:

$$(P, E, F, M, \text{model}, \text{pmark}, \text{ptime}). \quad (1)$$

其中:  $P$  为有限过程集(连续子过程集),  $E$  为有限变迁集或称事件集,  $P \cap E = \emptyset$  (空集);  $F \subseteq (P \times E)$

$(E \times P)$  为流关系;  $M$  为过程模型库(子过程有效模型集);  $\text{model}: P \rightarrow M$  为过程模型映射;  $\text{pmark}: P \rightarrow \{0, 1\}$  为逻辑变量,表示当前的离散标识(离散状态);  $\text{ptime}: P \rightarrow R^+$  为时间变量,表示当前的连续标识(连续状态);  $\text{model}(p)$  表示子过程  $p \in P$  当前所采用的一个有效过程模型;  $\text{pmark}(p)$  表示子过程  $p$  的运行标志,  $\text{pmark}(p) = 1$  表明子过程  $p$  启动或在运行;  $\text{ptime}(p)$  为离散标识  $\text{pmark}(p)$  最小可能持续时间

这里,  $\text{ptime}(p)$  是过程  $p$  运行时连续状态在时间上的反映.当  $\text{pmark}(p) = 1$  时,  $\text{ptime}(p)$  表示过程  $p$  运行至终点所需的最少剩余时间,它受到过程模型  $\text{model}(p)$  的制约,是变化和可控的;当  $\text{pmark}(p) = 0$  时,约定  $\text{ptime}(p) = 0$

$(\text{pmark}, \text{ptime})$  是由逻辑和时间变量构成的混合标识,因此变计时过程/变迁网也是一种混合标识过程/变迁网.  $(\text{pmark}, \text{ptime})$  的演化分别受制于事件的驱动和对子过程实施的具体控制

**外延公理 1**(离散事件使能机制) 在当前标识  $(\text{pmark}, \text{ptime})$  下,如果满足条件:

$$\text{pmark}(p) = 1, \text{ptime}(p) = 0, p \in e; \quad (2)$$

$$\text{pmark}(p) = 0, p \in e. \quad (3)$$

则称事件  $e$  使能(具有发生权),记为  $(\text{pmark}, \text{ptime})[e >]$ .

**外延公理 2**(离散标识迁移机制) 在当前标识  $(\text{pmark}, \text{ptime})$  下,如果事件  $e$  使能并发生,则离散标识按如下规则迁移至  $\text{pmark}$  (新标识),记为  $(\text{pmark}, \text{ptime})[e > \text{pmark}]$ .

$$\text{pmark}(p) =$$

$$\begin{cases} \text{pmark}(p), (p \in e, e) \rightarrow (p \in e, e); \\ \text{pmark}(p), (p \in e) \rightarrow (p \in e) \text{ or } \\ (p \in e) \rightarrow (p \in e); \\ p \in P. \end{cases} \quad (4)$$

**外延公理 3**(连续标识演化机制) 在当前离散标识  $\text{pmark}$  下,连续标识按如下规则演化:

$$\text{ptime}(p) = \begin{cases} \min_{u_p(t)}(t_{pe} - t_0), \text{pmark}(p) = 1; \\ 0, \text{pmark}(p) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $t_0$  为当前时刻,  $t_{pe}$  为过程  $p$  在模型  $\text{model}(p)$  主导下实施  $u_p(t)$  控制状态进入终点集的时刻

设连续子过程  $p \in P$  的状态模型为

$$\dot{x}_p(t) = f_p(x_p(t), u_p(t)). \quad (6)$$

其中:  $x_p(t) \in X_p \subseteq R^{n_p}$  为  $t$  时刻状态,  $X_p$  为  $n_p$  维连续状态集;  $u_p(t) \in U_p \subseteq R^{m_p}$  为  $t$  时刻施加的控制,  $U_p$  为  $m_p$  维允许控制集;  $f_p: R^{n_p} \times R^{m_p} \rightarrow R^{n_p}$ . 则过程  $p$  的数学模型可表示为如下 7 元组:

$$\text{model}(p) = (X_p, U_p, f_p, x_p(t_0), u_p(t_0), X_{p0}, X_{pe}). \quad (7)$$

其中:  $X_{p0} \subset X_p$  为当前状态的区域估计,  $X_{pe} \subset X_p$  为希望的过程终点状态集

由此,当  $\text{pmark}(p) = 1$  时,  $\text{ptime}(p)$  的计算可归结为求解如下最速控制问题:

$$\begin{aligned} \text{ptime}(p) &= \min_{u_p(t)}(t_{pe} - t_0), \quad (8) \\ \text{s.t. } \dot{x}_p(t) &= f(x_p(t), u_p(t)), \\ x_p(t_0) &\in X_{p0}, x_p(t_{pe}) \in X_{pe}, \\ u_p(t) &\in U_p. \end{aligned}$$

在特殊情况下,如果  $\text{ptime}(p)$  在  $p$  运行全程随时钟呈线性减小,则其演化机制可由下式简单描述:

$$\text{ptime}(p)(t_0 + \Delta t) = \text{ptime}(p)(t_0) - \Delta t, \quad (9)$$

其中  $\Delta t$  为计算周期

## 3 变计时过程/变迁网的运行节奏

**定义 2** 在  $E$  上定义一组新的逻辑与时间变量

$$\text{emark}: E \rightarrow \{0, 1\}, \quad (10)$$

$$\text{etime}: E \rightarrow R^+, \quad (11)$$

$$\text{etim}: E \rightarrow R^+. \quad (12)$$

其中:  $\text{emark}(e)$  为事件  $e$  的使能逻辑,  $\text{etime}(e)$  为事件  $e$  的使能逻辑持续所需的最少时间,  $\text{etim}(e)$  为事件  $e$  的近期使能所需的最少时间

**定义 3** 若  $\text{emark}(e) = 1$ , 则称当前事件  $e$  在逻辑上使能,记为  $\text{emark}[e >]$ ;  $\text{etime}(e)$  表示事件  $e$  使

能所需的最少剩余时间, 故称事件  $e$  为  $\text{etime}(e)$ - 使能, 记为  $(\text{pmark}, \text{ptime})[e: \text{etime}(e) > .$

$(\text{emark}, \text{etime}, \text{etim})$  表征了系统的运行节奏, 可依据  $(\text{pmark}, \text{ptime})$  按如下公式计算得到:

$$\text{emark}(e) = \begin{cases} 1, \{ \text{pmark}(p) = 1, p \dot{\cdot} e \} \\ \{ \text{pmark}(p) = 0, p \dot{\cdot} e \}; \\ 0, \text{others} \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{etime}(e) = \begin{cases} \text{etime}(e), \text{emark}(e) = 1; \\ 0, \text{emark}(e) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$\text{etim} = \min \text{tim}, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{s t } \text{tim}(e) &= \max_{p \dot{\cdot} e} \text{ptime}(p), \\ \text{tim}(e) &= \max \{ \text{ptime}(p), \text{tim}(e) \}, \\ \text{pmark}(p) &= 1, p \dot{\cdot} e, e \dot{\cdot} p; \\ \text{time}(e) &= \text{time}(p) + \text{tim}(e), \\ \text{pmark}(p) &= 0, p \dot{\cdot} e, e \dot{\cdot} p; \end{aligned} \quad e \in E.$$

这里,  $\text{time}: P \mid R^+, \text{time}(p)$  为过程  $p$  全程运行所需时间参数;  $\text{tim}: E \mid R^+$  为计算所需的中间时间变量

#### 4 受控变计时过程 / 变迁网

定义 4 称如下 8 元组为受控的变计时过程 / 变迁网:

$$(P, E, F, M, \text{model}, \text{pmark}, \text{ptime}, \text{setime}). \quad (16)$$

其中:  $\text{setime}: E \mid R^+$  为实时监控策略,  $\text{setime}(e) = 0$  表示允许事件  $e$  使能,  $\text{setime}(e) > 0$  表示允许事件  $e$  使能所需最小时间

在受控情况下, 复杂混杂动力学系统事件的使能机制和系统的运行节奏将发生变化. 此时,  $(\text{pmark}, \text{ptime})[e > .$  成立的充要条件为

$$\begin{aligned} \{ \text{pmark}(p) = 1, \text{ptime}(p) = 0, p \dot{\cdot} e \} \\ \{ \text{pmark}(p) = 0, p \dot{\cdot} e \} \quad \{ \text{setime}(e) = 0 \}. \end{aligned} \quad (17)$$

系统的运行节奏  $\text{etim}$  可按下式计算:

$$\text{etim} = \min \text{tim}; \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{s t } \text{tim}(e) &= \max_{p \dot{\cdot} e} \text{ptime}(p), \text{setime}(e); \\ \text{tim}(e) &= \max \{ \text{ptime}(p), \text{tim}(e), \text{setime}(e) \}, \\ \text{pmark}(p) &= 1, p \dot{\cdot} e, e \dot{\cdot} p; \\ \text{time}(e) &= \text{time}(p) + \max \{ \text{tim}(e), \text{setime}(e) \}; \end{aligned}$$

$$\text{pmark}(p) = 0, p \dot{\cdot} e, e \dot{\cdot} p, \quad e \in E.$$

#### 5 实时监控与调度

对于复杂的混杂动力学系统, 实时监控与调度的目的主要在于使系统运行的节奏尽可能地快捷和协调, 可通过如下优化问题来求解最优实时监控策略  $\text{setime}: E \mid R^+$  与最优实时调度策略  $\text{sptime}: P \mid R^+$ :

$$\text{etim} = \min_{\text{setime}} \text{tim}; \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{s t } C(\text{tim}) &= 0; \\ \text{tim}(e) &= \max \{ \max_{p \dot{\cdot} e} \text{ptime}(p), \text{setime}(e) \}, \\ \text{tim}(e) &= \max \{ \text{ptime}(p), \text{tim}(e), \text{setime}(e) \}, \\ \text{pmark}(p) &= 1, p \dot{\cdot} e, e \dot{\cdot} p; \\ \text{tim}(e) &= \text{time}(p) + \max \{ \text{tim}(e), \text{setime}(e) \}, \\ \text{pmark}(p) &= 0, p \dot{\cdot} e, e \dot{\cdot} p; \end{aligned} \quad e \in E.$$

$$\text{sptime} = \max \text{ptime}; \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{s t } \text{etim}(e) &= \max_{p \dot{\cdot} e} \text{ptime}(p), \text{setime}(e); \\ \text{etim}(e) &= \max \{ \text{ptime}(p), \text{etim}(e), \text{setime}(e) \}, \\ \text{pmark}(p) &= 1, p \dot{\cdot} e, e \dot{\cdot} p; \\ \text{etim}(e) &= \text{ptime}(p) + \max \{ \text{etim}(e), \text{setime}(e) \}, \\ \text{pmark}(p) &= 0, p \dot{\cdot} e, e \dot{\cdot} p; \end{aligned} \quad e \in E.$$

其中:  $C(\text{tim}) = 0$  为系统节奏协调约束方程;  $\text{ptime}: P \mid R^+, \text{tim}: E \mid R^+$  为计算所需的中间时间变量; 式(20)中  $\text{setime}$  和  $\text{etim}$  由式(19)确定

#### 6 实时过程控制

当  $\text{pmark}(p) = 1$  时, 可基于  $\text{sptime}$ , 通过求解如下泛函优化问题, 确定其最佳的实时过程控制策略  $u_p^*(t), t \in [t_0, t_0 + \text{sptime}(p)]$ :

$$J(x_p^*(t), u_p^*(t)) = \min_{u_p(t)} J(x_p(t), u_p(t)), \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \text{s t } \dot{x}_p(t) &= f(x_p(t), u_p(t)), \\ x_p(t_0) &= X_{p0}, \\ x_p(t_0 + \text{sptime}(p)) &= X_{pe}, \\ u_p(t) &= U_p. \end{aligned}$$

其中:  $t_0$  为当前时刻,  $J$  为特定的性能指标泛函

(下转第 1281 页)

期的销售商组成的供应链库存系统,从供应链整合的角度对折损产品的库存系统进行了优化。从本文的研究结果可以发现,采用整合策略可有效降低总库存成本,实现双赢的目的。虽然本文考虑的是两个销售市场的情形,但本文的研究方法和结果同样可以推广到多个销售市场中存在多个销售商的复杂情况,为研究更为复杂的供应链模式提供了基础。

#### 参考文献(References):

- [1] Wee H M. Economic production lot size model for deteriorating items with partial back-ordering[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1993, 24(3): 449-458
- [2] Goyal S K, Giri B C. Recent trends in modeling of deteriorating inventory[J]. *European J of Operational Research*, 2001, 134: 1-16
- [3] 周永务, 杨善林. 可变动货费用情形下变质物品经济批量问题[J]. *系统工程与电子技术*, 2000, 22(12): 36-40  
(Zhou Y W, Yang S L. Economical lot-sizing problem for deteriorating items under the situation of variable ordering cost[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(12): 36-40)
- [4] 周永务. 通货膨胀对带有时变需求的变质性物品库存补充策略的影响[J]. *运筹学学报*, 1998, 2(1): 42-50  
(Zhou Y W. Effect of inflation on the inventory replenishment policy for deteriorating items with time-varying demand[J]. *OR Trans*, 1998, 2(1): 42-50)
- [5] Yang P C, Wee H M. An integrated multi-lot-size production inventory model for deteriorating item[J]. *Computers & Operations Research*, 2003, 30(5): 671-682
- [6] Rau H, Wu M Y, Wee H M. Integrated inventory model for deteriorating items under a multirechelon supply chain environment[J]. *Int J of Production Economics*, 2003, 86(2): 155-168
- [7] Yang P C, Wee H M. Economic ordering policy of deteriorated item for vendor and buyer: An integrated approach[J]. *Production Planning & Control*, 2000, 11(5): 474-480
- [8] Wee H M, Jong J F. An integrated multi-lot-size production inventory model for deteriorating items[J]. *Management & Systems*, 1998, 5(1): 97-114

(上接第 1277 页)

## 7 结 论

本文的变计时过程/变迁网,可用于描述复杂工业过程等一类复杂的混杂动力学系统,它具有对底层子过程的过程模型的集成功能,并能有效地解决混杂动力学系统离散变量与连续变量之间的耦合衔接、事件的实时监控、过程的实时调度等应用问题。

#### 参考文献(References):

- [1] 徐心和, 李政国, 李彦平. 一类混杂系统的广义 Petri 网模型[J]. *自动化学报*, 1997, 23(3): 297-301  
(XU X H, LI Z G, LI Y P. Generalized PetriNet model for a class of hybrid systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1997, 23(3): 297-301)
- [2] 郑大钟, 郑应平. 离散事件动态系统理论: 现状与展望[J]. *自动化学报*, 1992, 18(2): 129-142  
(ZHENG D Z, ZHENG Y P. The current state and developing trends of DEDS theory[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1992, 18(2): 129-142)
- [3] 郑锋, 孙树栋, 吴坚. 基于扩展 Petri 网的混合流程生产过程建模[J]. *机械科学与技术*, 2003, 22(2): 318-322  
(ZHENG F, SUN S D, WU J. An extended PetriNet for modeling batch processes[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2003, 22(2): 318-322)
- [4] 李志武, 贾建援. 自动制造系统 Petri 网的公平性控制策略[J]. *自动化学报*, 2003, 29(1): 62-71  
(LI Z W, JIA J Y. A fairness and liveness control policy of petriNet model for automated manufacturing system[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(1): 62-71)
- [5] 袁崇义. Petri 网[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989.
- [6] Benveniste A, Guernic P L. Hybrid dynamic systems theory and the signal language[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1990, 35(5): 535-546
- [7] Henzinger T A. The theory of hybrid automata[A]. *Proc of the 11th Annual IEEE Symposium on Logic in Computer Science* [C]. New Jersey: IEEE Computer Society, 1996 278-292