

化工间歇过程的时间 Petri 网模型和优化控制

吴 锋 刘文煌

郑应平

(清华大学国家 CIMS 研究中心·北京, 100084) (中国科学院自动化所·北京, 100080)

摘要: 针对化工间歇生产过程的特点及优化问题, 本文提出用时间 Petri 网对过程建模, 用动态规划方法对过程实行优化控制, 并研究了该优化策略下的算法和控制设计问题。

关键词: 化工间歇过程; 时间 Petri 网; 优化控制

1 引 言

化工间歇过程至今缺乏有效的建模与优化控制策略, 文[1]呼吁必须加强研究该生产过程中的自动化问题. 由于该过程在操作上具有程序性、并发性, 在优化控制上具有随动性(优化值不是恒定的稳态值), 因而不能完全套用连续过程或离散过程中的一系列方法.

为此, 我们引入时间 Petri 网建模过程, 应用动态规划方法求解优化控制器, 从而给研究工作既考虑了过程的时间因素、并发现象, 也处理了过程优化问题. 一个实例仿真表明了模型和优化策略的有效性.

2 时间 Petri 网

为了建模和优化过程, 先给出时间 Petri 网的定义.

定义 1 一个时间 Petri 网是一个 6 元组 $G = (P, T, I, O, M(0), \theta_p)^{[5]}$, 其中:

P 为有限状态位置集, $P = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$; T 为有限变迁集, $T = \{t_0, t_1, \dots, t_m\}$; $I: T \rightarrow P^\infty$ 为输入函数; $O: T \rightarrow P^\infty$ 为输出函数; $M(0): P \rightarrow N$ 为初始标识; $\theta_p: P \rightarrow R^{\geq 0}$ 为 token 在状态位置中的时延, $\theta_p = \{\theta_{p_0}, \theta_{p_1}, \dots, \theta_{p_n}\}$.

从定义 1 中可以得出 k 到 $k+1$ 步的状态转移方程

$$M(k+1) = M(k) + CU(k). \quad (1)$$

其中, M 为状态标识, $U(k)$ 为能够触发转移的向量, C 为 $n \times m$ 的位置-变迁关联矩阵, 且 $C = C^+ - C^-$.

当一个变迁使能时, 它或许并不立即触发, 这是因为间歇过程运行的正确性, 不仅依赖于过程行为的逻辑结果, 而且还依赖于结果产生的时间, 这正是我们选用时间 Petri 网表达过程行为的原因.

用 $A_M(\tau_k)$ 表示 $M(k)$ 下状态位置中 Token 的到达时间, $A_M(\tau_k) = (a_0(\tau_k), a_1(\tau_k), \dots, a_n(\tau_k))$, 其中

$$a_i(\tau_k) = \begin{cases} \tau_k, & \text{如果 } M_i(\tau_k) = 1 \text{ 且 } \tau_k \text{ 为 } p_i \text{ 中 token 的到达时间(绝对时间);} \\ -1, & \text{如果 } M_i(\tau_k) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

令 t_j 为 Petri 网从状态 k 到 $k+1$ 的转移过程中的任一使能变迁, 则该使能变迁的最早触发时间 ξ_j 可由下式计算^[2,5]:

$$\xi_j(\tau_k) = \max_{p_i \in I(t_j)} (\theta_{p_i} + a_i(\tau_k)). \quad (3)$$

$I(t_j)$ 为变迁 t_j 的所有输入位置集. 式(3)表明, 一旦 t_j 的所有输入位置中均有 token, 则 t_j 的最早触发时间应当是其所有输入位置中 token 的到达时间与其时延之和的最大者.

3 动态规划与优化策略

动态规划^[4]是一种分步求解带有约束条件的函数极值问题的有效方法, 它通过多段决策过程的途径求取全过程的最优.

假设过程的状态转移函数为 $X_{k+1} = AX_k + BU_k$, (4)

其最优控制命题为寻找一个最优控制序列 $\{U_k\}$, 使过程的某个性能指标达到极值, 即

$$J^* = \min J = \min_{U_k} \sum_{k=0}^{N-1} L(X_k, U_k, k), \quad (5)$$

动态规划计算过程一般为后向递推, 则进一步改写式(5)为^[4,6]

$$J_k^*(i) = \min_{\substack{i \in S_k \\ j \in S_{k+1} \\ k \in [0, N-1]}} (Q_{k+1}(j) + C_{ij}^k). \quad (6)$$

其中 S_k 为 k 步下的有限整数集, C_{ij}^k 为变迁从 $i \in S_k \rightarrow j \in S_{k+1}$ 的效益, $Q_{k+1}(j)$ 为最小的累积效益, $J_k^*(i)$ 为 k 步的最小效益.

表达过程的网模型虽在时间上具有连续性, 但在空间的变迁上具有离散性, 事件空间集上每一步离散变迁的决策完全可用动态规划方法求解.

化工间歇过程的优化问题主要指过程数量品质的评价, 如投资最小, 产量最高, 能耗最小或生产周期最短等. 以过程资源的终极利用为例, 应用动态规划(式(4)~(6))求最佳加工效率或最短生产周期, 实际上就是求式(3)的最小值, 即

$$\gamma_{k+1} = \min_j (\xi_j(\tau_k)), \quad (7)$$

对应于 $\xi_j(\tau_k)$ 且满足式(7)的使能变迁, 就是对应于 $\xi_j(\tau_k)$ 的最小值(矢量的幅值)的变迁 $t_j^*(\tau_k)$, 即

$$t_j^*(\tau_k) = \arg(\min_j (\xi_j(\tau_k))). \quad (8)$$

式(8)表达了优化过程的控制序列.

令 $M(k)$ 下 $\xi_j(\tau_k)$ 时刻触发的变迁集为 $U(k)$, 对 $\forall p_i \in P$, 在优化控制序列的作用下的状态转移方程是

$$a_i(\tau_{k+1}) = \begin{cases} \tau_{k+1}, & \text{如果 } p_i \in O(t_j^*(\tau_k)); \\ -1, & \text{如果 } p_i \in I(t_j^*(\tau_k)); \\ a_i(\tau_k), & \text{其它.} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)表明了状态最优迁移规则, 通过重复执行该规则, 可找到下一触发的最优变迁, 并计算出触发的绝对时间值.

4 过程建模与优化设计

假定间歇过程的所有操作状态已知, 这样每个操作状态的保持可等效为时间 Petri 网中的一个位置时延. 建模时, 先将整个化工过程以设备或装置为核心划分成若干相对独立的过程单元. 每个过程单元在基本控制器(基本控制器的设计由化工领域解决)控制下形成基本的工作流程(此称为子过程), 各个子过程由 Petri 网控制器全面协调、优化. 如何表达各个子过程并使整个过程在运行中保持最优, 其设计过程如下:

1) 首先将间歇过程中相对独立变化的子过程按自己规定好的工作顺序, 画出基本的 Petri 网; 2) 根据设计要求, 对子过程间需要协调、同步的活动进行协调、同步设计; 3) 根据计算, 赋予每个位置以一定的时延.

在得到过程网模型之后,再进行优化设计就显得极为方便.我们称网模型G按设计的优化算法运行为优化控制器.为此,利用前面的结论在G中引入这种动态控制算法来实现对G的优化控制.该算法的基本思想是:根据G的当前状态和该状态发生的时间;确定下一步G中可能发生的最优变迁集.算法如下:

Step 1 $M(0) \rightarrow G, \theta_p \rightarrow G, C \rightarrow G, U(0) \rightarrow G;$

Step 2 由式(2)输入当前状态 $M(k)$ 及 $a_i(\tau_0);$

Step 3 计算 $\xi_j(\tau_k), \gamma_k;$

Step 4 由式(8)寻求 $t_j^*(\tau_k);$

Step 5 IF $P_i \in O(t_j^*(\tau_k))$ THEN $a_i(\tau_{k+1}) = \tau_{k+1}$ ELSE

IF $p_i \in I(t_j^*(\tau_k))$ THEN $a_i(\tau_{k+1}) = -1$ ELSE $a_i(\tau_{k+1}) = a_i(\tau_k);$

Step6 由式(2)确定 $M(k+1)$, 转 Step 2).

5 设计仿真

图1表示了一种常见的化工间歇过程,由三个容器组成.2#带有加热器,3#带有搅拌器.其工作原理是:1#,2#分别用泵V1,V2从碱和聚物库中将其抽满;抽满后传感器发出信号,V1,V2关闭;然后2#加热到60°C,关掉加热器,V3,V4打开,同时启动搅拌器,搅拌时间为50秒;一旦3#满或1#,2#空,则V3,V4停;当搅拌时间到,V5将混合液抽走,直到3#空;新的循环可以重新开始.

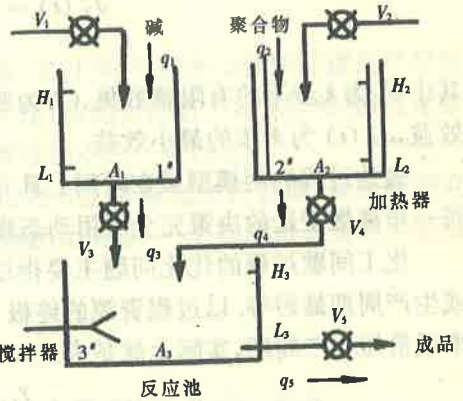


图1 化学反应过程示意图

根据前面所述的建模策略,得到它的Petri网模型

如图2所示.在图2中,每个操作状态用一个位置、两个变迁表示.第一个变迁表示操作状态的开始,第二个变迁表示操作状态的结束,而位置表示其本身.此外,一些表示起始位置如 p_0, p_5, p_{10} 及一些表示资源位置如 p_{14}, p_{15}, p_{16} 应与相应的变迁相联.资源位置的引入是为了资源之间信息的传递,它既是一种资源状态开始变迁的输入,又是另一种资源状态结束变迁的输出.图中的每个位置及相应的变迁含义见表1解释.

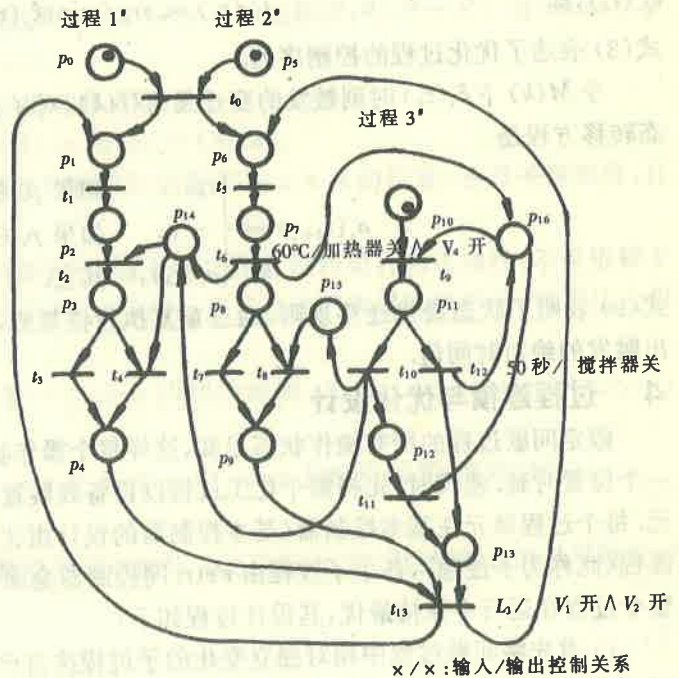


图2 化学反应过程的时间Petri模型

初始标识 $M(0) = (10000100001000000)$, 每个位置的时延 $\theta_p = (0, A_1(H_1 - L_1)/q_1, \theta_{60}, A_1(H_1 - L_1)/q_3, \varphi, 0, A_2(H_2 - L_2)/q_2, \theta_{60}, A_2(H_2 - L_2)/q_4, \varphi, 0,$

x/x:输入/输出控制关系

$A_3(H_3 - L_3)/(q_3 + q_4), \varphi, A_3(H_3 - L_3)/q_5, 0, 0, 0)$, 式中 H_i, L_i, A_i 分别为过程单元 i 的满标志、空标志及底面积, q_i 为泵 V_i 的流量, θ_{60} 和 φ 分别表示可量测的相应操作状态“加热到 60°C ”和“等待”的时延常数。

表 1 位置及相应的变迁含义

p_i	解释	t_i	解释
p_0	过程 1 [#] 开始	t_0	启动
p_1	抽碱	t_1	抽碱结束
p_2	满	t_2	放碱开始
p_3	放出碱	t_3	放碱结束
p_4	等待	t_4	混合过程停止
p_5	过程 2 [#] 开始	t_5	抽聚合物结束
p_6	抽聚合物	t_6	放聚合物开始
p_7	满了, 加热	t_7	放聚合物结束
p_8	放出聚合物	t_8	混合过程停止
p_9	等待	t_9	混合开始, 同时搅拌
p_{10}	过程 3 [#] 开始	t_{10}	混合结束
p_{11}	将碱与聚合物混合并搅拌	t_{11}	开始抽走成品
p_{12}	等待	t_{12}	搅拌结束
p_{13}	抽走成品	t_{13}	停止抽走成品, 并开始新启动
p_{14}	过程单元 1 [#]		
p_{15}	过程单元 2 [#]		
p_{16}	过程单元 3 [#]		

为了简化, 现令变迁 t_0 发生的起始时间为 τ_0 , 且 $A_1 = A_2 = A_3 = A, H_1 - L_1 = H_2 - L_2 = \Delta L, H_3 - L_3 = 2\Delta L, q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = q$, 利用文[3]介绍的 Petri 网仿真环境模拟该过程的时间 Petri 网运行, 每一步的迁移均以时间最优(Step 1 ~ Step 6)为准则, 由此可求得最短的生产周期 = $3A + 50 + \theta_{60}$ 。例如, 在仿真 p_{11} 的迁移中, 由于

$$\frac{H_3 - L_3}{q_3 + q_4} A_3 = \frac{\Delta L}{q} A > 50,$$

则相比 t_{10}, t_{12} 为最优秀迁, 其余每步类推。此外, 从得到的结果可以看出, 由于流量 q 的变化, 最优值是变化的, 为了得到较小值, 显然 q 在打开时应调到最大。

6 结 语

本文针对化工间歇过程的特点及其存在的优化问题, 首先引入了时间 Petri 网的建模方法, 给出基于动态规划的优化算法, 并就一典型化学反应过程在该建模方法与优化算法下进行了仿真。由于网模型自身的特点, 使得过程及其复杂的逻辑关系表达简洁而直观, 且优化算法易于实现。进一步的研究应当是在集成框架下如何同步优化设计基本控制器和上层 Petri 网控制器问题, 这时一种可能的方法是在本文的基础上引入混杂 Petri 网^[7]或时段演算^[8]等工具刻画该过程的动态行为。

参 考 文 献

- 2 王丽亚, 吴智铭. 实时并发离散事件系统的监控. 控制与决策, 1995, 10(1):75-79
- 3 杨光宇. 面向对象的 Petri 网建模与仿真环境. 中国科学院自动化所复杂系统控制问题研究论文集, 北京, 1995, 1:111-115
- 4 吕勇哉. 工业过程模型化及计算机控制. 北京: 化学工业出版社, 1986
- 5 Murata, T. Petri nets: properties, analysis and applications. Proc. of the IEEE, 1989, 77(4):541-580
- 6 Lloyd, L. and Salleh, Y. Md. Modeling and control of batch process plant by timed Petri Net. Proc. of the 30th CDC, 1991, 1531-1536
- 7 David, R., Alla, H. Petri Nets for modeling of dynamic systems—a survey. Automatica, 1994, 30(2):175-202
- 8 Zhou chaochen, Hoare, C. A. R. and Ravn, A. P. A calculus of durations. Information Processing Letters, 1991, 40(5):269-275

A Timed Petri Net Model and Optimal Control of Chemical Batch Process

WU Feng and LIU Wenhua

(Center of State CIMS Research Tsinghua University • Beijing, 100084, PRC)

ZHENG Yingping

(Institute of Automation Chinese Academy of Sciences • Beijing, 100080, PRC)

Abstract: This paper uses both timed Petri net and dynamic programming for modeling and optimizing chemical batch process in accordance with their special characteristics and optimization problems. The resulting algorithm and control design through the optimal strategy and supervisory implementation are researched.

Key words: chemical batch process; timed Petri net; optimal control

本文作者简介

吴锋 1965年生. 1993年和1996年分别在清华大学自动化系和中国科学院自动化研究所获硕士和博士学位. 现为清华大学国家CIMS工程研究中心博士后, 主要从事离散事件系统、混杂系统理论及应用、CIMS工程应用研究工作.

刘文煌 1947年生. 1970年毕业于清华大学自动化系. 现为清华大学自动化系副教授, 国家CIMS工程研究中心副主任. 主要研究方向为工业自动化及CIMS工程应用等.

郑应平 1941年生. 1963年毕业于北京大学数力系, 1967年在中国科学院自动所研究生毕业. 现为该所研究员、博士生导师. 主要研究方向为系统与控制理论、多人决策与动态对策理论、离散事件系统理论、CIM方法论及应用等.