

基于赋时 Petri 网的化工批处理 过程建模与控制优化*

李慧芳 李人厚

(西安交通大学系统工程研究所 710049)

摘要 分析了化工批处理过程的特点,以过程设备为核心将整个过程操作划分为若干个子进程。用赋时 Petri 网来建立以子进程表示的批处理过程,并提出启发式动态优化算法对过程进行控制。仿真结果表明,基于赋时 Petri 网模型与启发式动态优化算法的 Petri 网控制器,不仅能准确描述批处理过程的同步、并发及资源共享关系,而且 Petri 网的运行能给出过程生产的最优控制序列。

关键词 化工批处理过程,赋时 Petri 网,最优控制序列

分类号 TP 278

Modeling of Batch Chemical Plant and Control Optimization Based on Timed Petri Nets

Li H uif ang, Li Renhou

(Xi an Jiaotong University)

Abstract The characteristics of batch chemical plant are analyzed. The whole plant is divided into several subprocesses in the core of plant unit. Batch process plant described by subprocess is modeled by timed Petri nets, and heuristic dynamic optimization algorithm is proposed to control the plant. Simulation results indicate that the Petri nets controller based on Petri nets model and heuristic dynamic optimization algorithm, can not only describe synchronous, concurrent and shared resources situation, but also produce optimal control sequence of plant through the running of Petri nets.

Key words batch chemical plant, timed Petri nets, optimal control sequence

1 引 言

在化工批处理过程中,反应物一次加料,经过一段反应时间并达到所需的转化率后,产物一次卸出。过程反应所需的实际时间,除反应时间外,还应包括加料、调温、卸料和清洗等辅助时间,生产是分批间歇的。批处理过程在操作上具有程序性、并发性,因而属于离散事件动态系统(DEDs)。目前,批化工过程自动化所面临的主要困难是缺乏合适有效的建模技术。

本文在赋时 Petri 网模型的基础上,提出了将动态优化算法与启发式调度规则相结合来设计批处理过程的 Petri 网控制器,一方面准确地描述了生产

过程的异步、并发、时间关系及资源共享;另一方面,控制作用表现为按优化算法和启发式调度规则运行 Petri 网的过程,可以给出最优的过程活动序列,并使各产品的 makespan(最大完工时间)最小。实例仿真说明了本文设计方法的有效性。

2 赋时 Petri 网及其状态方程

赋时库所 Petri 网(TPPN)^[2,3] 可用如下 6 元组表示。

$$TPPN = (P, T, I, O, M_0, DT)$$

其中, (P, T, I, O, M_0) 是基网, P 是由简单库所、动作库所和控制库所组成的有限库所集,简单库所表示资源(反应器、原料或中间产品),动作库所表示过程操作,控制库所表示外部控制; T 是由可控和不可控变迁组成的有限变迁集,可控变迁的触发可通过

* 1999-07-20 收稿, 2000-01-17 修回

外部控制禁止, 反之称为不可控变迁; $DT: P \rightarrow R^+$ 为托肯在相应库所中的逗留时间, $DT = \{d\tau_0, d\tau_1, \dots, d\tau_n\}$ 。

在 Petri 网表示的事件驱动系统中, 每一库所、变迁分别由一个条件、事件唯一标识。在第 k 步, 网的标记由 n 维行向量 $M(k) = [m_{p_0}(k), m_{p_1}(k), \dots, m_{p_n}(k)]$ 给出, 初始标记 $M_0 = M(0)$ 。Petri 网标记从 k 步至 $k+1$ 步的演化可由如下状态转移方程来描述。

$$M(k+1) = M(k) + Hu(k) \quad (1)$$

其中, H 为 $n \times m$ 邻接矩阵^[1], $u(k)$ 为 m 维控制列向量, 即第 k 步触发矢量。在 $u(k)$ 中, 与第 k 步触发的变迁相对应位置处, $u(k)$ 的元素为 1, 其余元素为 0。

由于实际系统的逻辑规范和时间约束, 当一个变迁使能时, 它也许并不立即触发。在实时批处理过程优化中, 系统的行为不仅取决于事件发生的逻辑结果, 而且取决于事件发生的时间。这里采用 T PPN 建模, 所有变迁的触发都是瞬时的。在状态向量 $x(\tau_k) = [x_0(\tau_k), x_1(\tau_k), \dots, x_n(\tau_k)]$ 中, $x_i(\tau_k)$ 表示托肯到达库所 p_i 中的时间。假设系统的全局时钟为 Timer, $I_p(t), O_p(t)$ 为变迁 t 的输入 / 输出库所集合, 则 $x(\tau_k)$ 的定义隐含了某时刻 k 网中托肯的分布及托肯的到达时间两个方面。对于给定的初始标记 M_0 , 初始状态矢量为

$$x_i(\tau_0) = \begin{cases} \tau_0, & p_i(\tau_0) = 1 \\ 0, & p_i(\tau_0) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

延时矢量 DT 包含每一库所的延迟时间 $d\tau_i$ 。在使能矢量 $v(\tau) = [v_0(\tau), v_1(\tau), \dots, v_m(\tau)]$ 中, $v_j(\tau)$ 表示变迁 t_j 可触发的最早时间, $v(\tau)$ 的元素可计算如下

$$v_j(\tau) = \max_{p_i \in I_p(t_j)} \{d\tau + x_i(\tau)\} \quad (3)$$

式(3)说明当一个托肯到达 p_i 后, 它至少应在 p_i 中逗留 $d\tau$ 个时间单位, 才可用于其使能输出变迁的触发。

3 动态规划及优化算法

动态规划是用于分步求解带有约束条件的函数极值问题的有效方法, 它通过多段决策的途径求得全过程的最优。假设给定:

1) 系统的状态转移方程

$$x(k+1) = f[x(k), u(k), k] \quad (4)$$

其中, f 为 n 维矢量函数, k 为时间阶段变量, $x(k), u(k)$ 分别为 k 阶段的状态矢量 / 控制矢量。

2) 性能判据

$$J = \sum_{k=0}^K L[x(k), u(k), k] \quad (5)$$

其中 L 为标量函数。

3) 约束

$$x \in X(k), u \in U(x, k) \quad (6)$$

其中 $X(k), U(x, k)$ 分别为状态矩阵 / 控制矩阵。

最短路径问题可描述为: 给定式(4) ~ (6) 及初始状态 $x(0)$, 寻找一个最优控制序列 $u(0), u(1), \dots, u(K)$ 使 J 最小, 并满足约束(6)。动态规划的计算一般为后向递推过程, 则式(5)可改写成

$$J_k(i) = \min_{j \in S_{k+1}, i \in S_{k,k} \in [0, K]} \left[Q_{k+1}(j) + C_{ij}^k \right] \quad (7)$$

其中, S_k 为 k 段的有限整数集, C_{ij}^k 为系统从状态 $i \in S_k$ 转移至状态 $j \in S_{k+1}$ 引起的效益, $Q_{k+1}(j)$ 为最小的累积效益, $J_k(i)$ 为 k 段的最小效益。

由赋时 Petri 网表示的批处理系统, 其状态的转移具有阶段性, 但相邻状态在时间上却是连续的, 因此事件轨迹上每一步离散变迁的决策可用动态规划求解。对批处理优化的生产周期最短问题, 实际上是求式(3)的最小值 $\min v_j(\tau)$ 问题。如果没有预先定义变迁触发序列, 一旦变迁使能便立即触发, 那么下一个要触发的变迁相应于 $v(\tau)$ 中元素的最小值

$$t_j^* = \arg \left[\min_{j \in [1, m]} (v_j(\tau_k)) \right] \quad (8)$$

下一个触发出现的瞬时即为 $v(\tau)$ 的最小元素, $\tau_{k+1} = \min_j (v_j(\tau_k))$ 。设 $u(k)$ 为 $M(k)$ 下 τ_{k+1} 时刻触发的变迁集, 则对 $\forall p_i \in P$, 在优化控制序列作用下, 网的状态 $x(\tau_k)$ 按下式进行演化。

$$x_i(\tau_{k+1}) = \begin{cases} \tau_{k+1}, & p_i \in O_p(t_j^*(\tau_k)) \\ 0, & p_i \in I_p(t_j^*(\tau_k)) \\ x_i(\tau_k), & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

式(8), (9)给出了时间最短的最优状态转移规则。该算法重复执行, 直至到达一个新的状态, 从而可找到下一个使能的最优变迁及其触发时间。

4 化工批处理过程的 Petri 网建模与控制设计

在化工批处理过程的离散事件系统中, 基于 Petri 网的控制器由过程的 Petri 网模型及控制优化算法组成。建模时, 将整个过程以批设备为核心划分为若干个相互独立的过程单元, 每一过程单元由一组相互关联的过程设备构成, 并在局部控制器的作用下运行为一个子进程, 以执行一个或多个操作(如

加料、加热、反应、卸料及清洗等)。各子进程之间的交互及资源共享则由 Petri 网控制器进行全面协调和优化。假设批处理过程的所有操作状态均可测量且已知, 则每一操作状态可用一个赋予固定时延的库所来表示。建模步骤如下:

1) 将批处理过程中与各产品流相应的独立子过程, 按其工艺流程画出基本的 Petri 网模型(子进程建模);

2) 确定所有已知的操作状态的保持时间, 并与库所相对应(操作状态建模);

3) 找出共享资源, 对子过程间需要协调和同步的活动进行协调和同步设计(子进程模型复合, 得到整个过程的 Petri 网模型)。

按照优化算法与启发式调度规则指导上述 Petri 网的运行, 以形成最优控制器。优化算法是: 根据网的当前状态和该状态发生的时间, 确定下一步可能发生的最优变迁集, 以使 makespan 为最小。仿真过程中采用强触发规则, 使能的变迁立即触发, 则当系统从初始状态 M_0 转移到终止状态 M_K 时, 相应批量的产品库所中托肯的到达时间即为该产品的 makespan, 而多个产品流的 makespan 中, 最大者为批处理生产系统的循环时间。具体算法如下:

Step1: 由网模型求出邻接矩阵 H , 根据过程的已知条件, 确定初始标记 $M_0 = M(0)$, 最终标记 $M_K = M(K)$ 以及延时矢量 DT , 并结合式(2) 计算初始状态矢量 $x(\tau_0)$;

Step2: 输入当前状态 $M(k)$ 及 $x(\tau_k)$;

Step3: 对每一个使能的变迁, 计算 $v_j(\tau_k) = \max_{p_i \in I_p(t_j)} \{d\tau + x_i(\tau_k)\}$, 进一步寻求 $t_j^* = \arg[\min(v_j(\tau_k))]$, 确定下一步要触发的变迁集(即控制矢量 $u(k)$);

Step4: 确定下一步触发的时刻 $\tau_{k+1} = \min_j (v_j(\tau_k))$, 并控制变迁的触发;

Step5: 由式(9) 计算新的状态转移矢量 $x(\tau_{k+1})$;

Step6: 由式(1) 计算新标记 $M(k+1)$;

Step7: 如果 $M(k+1) = M_K$, 则算法终止, 否则转 Step2。

在 Petri 网运行过程中, 如果发生资源争用冲突, 则用启发式调度规则对操作进行排序。本文选取 6 种调度规则^[4], 采用分层决策的方法, 动态地分配资源, 以减少设备空闲时间。即: 1) FCFS: 先到先服务; 2) SPT: 处理时间最短的操作优先; 3) MWKR: 剩余总加工时间最大的作业, 其操作优先; 4)

LWKR: 剩余总加工时间最小的作业, 其操作优先; 5) MONPNR: 剩余操作数最大的作业, 其操作优先; 6) RANDOM: 随机选择一操作。

经过大量仿真试验得出: 对使能的冲突变迁, 如果其所属作业的剩余操作数不同, 则按规则 5) 选择优先变迁, 否则按规则 3) 或 4) 选择优先变迁; 如果其所属作业的剩余操作数及剩余总加工时间均相同, 则按规则 6) 任意选择优先变迁。

5 实例仿真

图 1 所示的多目的批过程^[3], 由 3 个不同的批设备, 3 个批量相同的产品流程组成。批设备是由一组相互关联的过程设备构成, 以完成一个子进程。系统循环地执行预先定义的 7 项任务: 原料 A 分别在设备 R1, R3 上处理 4min, 3min, 生成产品 A; 原料 B 分别在设备 R2, R3 上处理 5min, 2min, 生成产品 B; 原料 C 分别在设备 R3, R1, R2 上处理 6min, 3min, 3min, 生成产品 C。

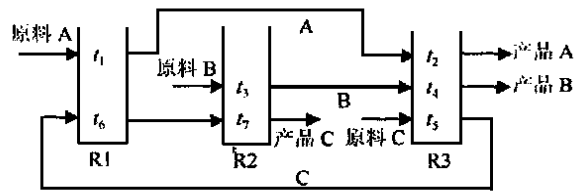


图 1 3 产品 3 设备的多目的批过程

如果将每一操作用一变迁对 (t, t') 和一个库所 p 来建模^[2], 其中 t, t' 表示操作的开始/ 终止, p 表示操作本身, 且 $p \in O_p(t), p \in I_p(t)$, 则在设备 R 中完成的子处理可用图 2 所示的子网来描述。其中 p, p' 表示原料/ 产品, r 表示处理设备。过程的 Petri 网模型图略。

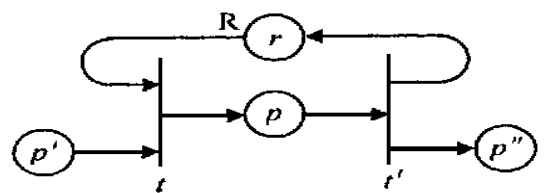


图 2 R 中子操作的 Petri 网模型

初始标识

$$M(0) = (1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1)$$

终止标识

$$M(K) = (0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1)$$

延迟矢量

$$DT = (0\ 4\ 0\ 3\ 0\ 0\ 5\ 0\ 2\ 0\ 0\ 6\ 0\ 3\ 0\ 3\ 0\ 0\ 0\ 0)$$

初始状态矢量

$$x(\tau_0) = (0\ 99\ 99\ 99\ 99\ 0\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 0\ 0\ 0)$$

其中99表示无穷大。假设 $\tau = 0$, 用MATLAB进行仿真, 如果出现资源争用冲突, 则调用启发式调度规则解决冲突。在仿真运行过程中, 模型不断检测冲突变迁, 并冻结仿真时钟直到冲突得以消除, 随后仿真继续进行。当到达终止状态 $M(K)$ 时, 相应的状态矢量演变为

$$x(\tau_k) = (99\ 99\ 99\ 99\ 11\ 99\ 99\ 99\ 99\ 8\ 99\ 99\ 99\ 99\ 99\ 12\ 9\ 12\ 11)$$

文献[3]在仿真过程中, 预先假定设备R1, R2, R3的处理顺序分别为CA, BC, CBA, 并以此来消除资源争用冲突。本文利用启发式调度规则, 并借助于分层决策法, 从冲突的变迁集中选出最优的变迁触发, 只需较少的迭代次数, 就可使批处理循环时间相对于文献[3]减小25%。仿真结果如表1所示。

表1 仿真结果比较

仿真方法	A 总加工 时间(min)	B 总加工 时间(min)	C 总加工 时间(min)	批处理循环 时间(min)	迭代 次数
文献[3]方法	16	8	12	16	11
本文方法	11	8	12	12	10

6 结 论

本文基于多目的批处理过程的赋时Petri网模型, 引入动态优化及启发式调度规则对过程进行控制。研究结果表明, 利用Petri网及动态优化算法设

计的Petri网控制器, 不仅能简洁而直观地表达多目的批处理过程中资源的复杂交互关系, 而且在Petri网的执行过程中嵌入启发式调度规则, 可以给出最优过程控制序列, 并使makespan为最小。进一步的研究应是系统的全局优化设计, 即局部控制器与上层Petri网控制器之间的协调和控制问题。

参 考 文 献

- 1 Murata T. Petri nets: Properties, analysis and application. Proc of the IEEE, 1989, 77(4): 541~580
- 2 Lloyd S, Salleh Y Md. Real-time control of batch process plant through timed Petri net modeling and dynamic optimization. In: 1st IFAC Workshop on Algorithms and Architectures for Real-time Control. Bangor, North Wales, 1991. 11~13
- 3 Lloyd S, Salleh Y Md. Modeling and control design of batch process plant by timed Petri net. In: Proc of the 30th Conf on CDC. Brighton, 1991. 1531~1536
- 4 French S. Sequencing and scheduling: An introduction to the mathematics of the job-shop. New York: John Wiley & Sons, 1982

作 者 简 介

李慧芳 女, 1966年生。1994年在西安交通大学信息与控制系获硕士学位, 现为该校系统工程研究所博士生。主要研究方向为离散事件动态系统, 化工批处理过程调度。

李人厚 男, 1935年生。1957年毕业于上海交通大学工业电气自动化专业, 现为西安交通大学系统工程研究所教授, 博士生导师。主要研究方向为智能控制理论与方法, 智能制造系统调度, 多媒体与CSCW理论及应用。

(上接第446页)

作 者 简 介

丁永生 男, 1967年生。东华大学副教授, 博士, 1996~1998年作为访问学者在美国得克萨斯大学医学院工作。主要学术方向为模糊控制, 智能控制, 人工免疫系统, DNA计

算等。

任立红 女, 1967年生。东华大学讲师, 在职博士生。主要学术方向为DNA计算, 软计算, 人工免疫系统, 智能控制等。