

# 多产品间歇过程调度问题的建模与优化

曹瑞金, 俞欢军, 胡上序

(浙江大学化工系, 杭州 310027)

**摘要:** 提出了一种基于有色赋时Petri网(CTPN)的多产品间歇过程调度问题的建模方法, 通过引入一类方案选择库所和方案评价变迁, 可以灵活地实现与各种优化方法的集成。给出了一个结合局部禁忌搜索的蚁群算法。通过示例, 表明了这种多产品间歇过程调度问题的建模与优化方法的有效性。

**关键词:** 多产品间歇过程; 有色赋时Petri网; 蚁群算法; 禁忌搜索

## Modeling and Optimization of Multiproduct Batch Plant Scheduling

CAO Ruijin, YU Huanjun, HU Shangxu

(Department of Chemical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**【Abstract】** The method of modeling and optimization of multiproduct batch plant scheduling with colored and timed Petri net is presented. A sequential order option place and a option evaluation transition are introduced to integrate oimization algorithm and solve the scheduling problem flexibly. An ant colony system with local tabu search algorithm is presented to overcome these defect. Through case study, the effectiveness of the proposed method is illustrated.

**【Key words】** Multiproduct batch plant; Colored and timed Petri net(CTPN); Ant colony algorithm; Tabu search

间歇化工过程包括两种形式: 多目的过程和多产品过程。多目的过程指同一种产品可能经过不同路径, 不同产品具有不同加工路径。多产品过程指所有产品经过同样的加工路径。多产品间歇过程普遍存在于精细化工、制药和食品等行业, 由于中间产品化学物理性质的不同, 常见的有以下几种中间存储策略: (1)无限中间存储(UIS); (2)有限中间存储(FIS); (3)无中间存储(NIS); (4)零等待(ZW); (5)有限等待(FW)。间歇过程生产中存在大量的顺序和并发操作, 对其进行建模与优化控制是间歇过程调度问题的一个重要内容。

一个完整的调度方法应该包括两个方面: (1)能够清晰、简洁地描述调度问题; (2)提供解决该形式化调度问题的优化方法。本文提出的基于有色赋时Petri网的多产品间歇过程调度问题的建模方法, 引入了一类方案选择库所和方案评价变迁, 可以方便地集成各种优化方法, 不仅具有很强的建模能力而且可以根据实际情况选择优化策略, 使求解这一类调度问题更加灵活方便。

多产品批处理调度是化工领域的一个典型问题, 在数学上是NP完全的, 因此近年来一些随机优化方法也被用于求解该问题, 如模拟退火<sup>[1]</sup>、蚁群算法<sup>[2]</sup>等。由于蚁群算法在组合问题领域表现出的良好性能, 国内也开始对此方法进行研究, 和其它随机优化算法类似, 它也会出现搜索时间过长等缺点。本文提出的结合局部禁忌搜索的蚁群算法可以加快搜索速度, 在求解多产品批处理调度问题上取得了很好效果。

### 1 调度问题建模

#### 1.1 问题陈述

多产品间歇生产过程调度一般作以下3个假设: (1)多种产品遵循同样的加工路径; (2)在加工过程中, 每批产品不能和其它批次的产品混合, 也不能分开在不同设备上处理; (3)原料和产品有足够的存储容量。调度问题一般描述为N个产品经过M类加工设备(每类设备可能有多个加工单元), 产品i在设备j上的加工时间为 $t_{ij}$ , 如何对产品排序使生产时间

最短, 该调度问题包含的子问题有两个: 产品排序和生产时间表<sup>[3]</sup>。

本文只考虑UIS和ZW两种中间存储策略。对于UIS间歇过程调度, 因为中间存储设备单元数量无限大, 加工产品在某个设备单元上一旦结束就立即释放此单元, 如果下一设备单元没有空闲, 则进入存储设备中等待。而对于ZW间歇过程调度, 因为没有中间存储设备, 加工产品在某个设备单元加工结束后直到进入下一设备单元才释放此加工单元, 又由于是ZW等待, 在某个单元中一旦达到要求加工时间, 必须立即向后移走, 如果加工过程不能满足这个约束条件, 必须推迟这一批产品的最早加工时刻。

#### 1.2 有色赋时Petri网

Petri网由于其强大的图形表达能力和成熟的数学分析理论, 非常适合用于系统建模, 应用于间歇过程调度建模方面也有很大的进展<sup>[4]</sup>。有色赋时Petri网是一种高级网系统, 即在Petri网的基础上给库所结点和变迁结点上引入了时间的参量, 不仅能够清晰地描述间歇生产的资源约束而且能够表示时间上的约束关系。另外, 对于Petri网中的托肯(token)赋予个性, 同一类的托肯染上同一种颜色, 不同类的托肯以不同颜色区分, 这样一个库所可以包含几类托肯, 一个变迁可以有多种变化, 可以大大降低模型的复杂性。图1是UIS多产品间歇生产过程调度Petri网模型, 图2是ZW多产品间歇生产过程调度Petri网模型, 图中库所和变迁的解释见表1。图1和图2中的虚框表示可能经过多个加工设备单元的简化图。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (20076041)

**作者简介:** 曹瑞金 (1972—), 男, 硕士生, 研究方向: 化工信息智能处理, 企业级信息系统; 俞欢军, 博士、副教授; 胡上序, 教授、博导

**收稿日期:** 2003-07-24

**E-mail:** caorj@infotech.zju.edu.cn

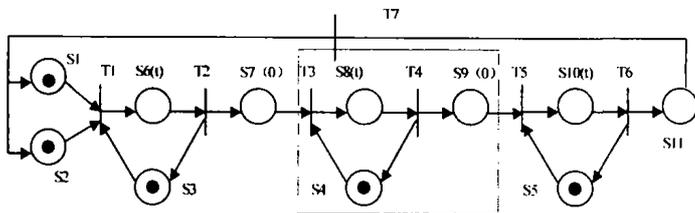


图1 UIS多产品间歇过程调度

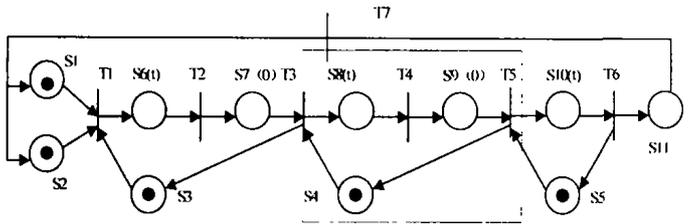


图2 ZW多产品间歇过程调度

表1 Petri网模型库所和变迁的解释

库所	变迁
S1	T1
S2	T2
S3,S4,S5	T3
S6,S8,S10	T4
S7,S9	T5
S11	T6
	T7

有色赋时Petri网模型的详细描述如下:

定义1 有色赋时Petri网是一个多元组CTPN=(P, T; F, C, L, l+, D, M<sub>0</sub>)。

其中:

(1) P为有限库所集, 一般用圆圈表示; T为有限变迁集, 一般用直线表示; F为连接P和T的流关系集合, 一般用有向弧表示。

(2) C=C(P)UC(T), 是有限库所集和有限变迁集上的颜色集合。

图1和图2中托肯的颜色有3种: S1中的托肯为产品排序方案类, 用颜色x表示, x.i表示方案x中第i批要加工的产品; S2中的托肯为待加工的产品类, 用颜色y表示, y=<产品1, 产品2, ...>产品i用y.i表示; S2中的待加工产品必须遵循S1中给定方案排序加工; S4、S5、S6中的托肯为表示空闲设备单元类, 用颜色m表示, m.i表示第i类设备, 每类设备还有不同的颜色表示不同的加工单元。变迁上的出现色表示变迁的不同发生方式, T1、T3和T5用复合色<x, y, m>表示, <x.i, y.j, m.k>表示这个复合色的一个单色, 即方案x中的第i批产品是产品j开始和设备k上加工。

有色Petri网是一种高级网技术, 可以把同一类的个体合并起来并且可以在同一层次上进行抽象, 因此图1和图2还可以进一步简化。但是过于忽略细节在图形表达方面不太直观, 因此这里不做进一步研究。

(3) L ∈ [C(P) → C(T)], l ∈ [C(T) → C(P)]。

(4) D是每个库所相关的时间参数。

图1和图2中S6(t)、S8(t)和S10(t)为赋时库所, 时间参数t表示托肯必须在这些库所中停留的时间。图2中的S7(0)、S9(0)表示瞬时库所, 即一旦这些库所中有托肯, 后继变迁必须马上触发移走托肯。没有时间参数的库所表示没有时间约束。

(5) M<sub>0</sub>为初始标识, 表示初始状态下托肯在库所中的分布。

图1和图2的M<sub>0</sub>=(x, y, m.1, m.2, m.3, 0, 0, 0, 0, 0, 0)。

定义2 如果存在一个变迁序列使得托肯从初始状态移动到中止状态, 当且仅当托肯流过的所有的赋时库所满足时间约束, 这也就是CTPN网的可调度性。

托肯从初始状态移动到中止状态过程中, 如果不满足可调度性, 则必须回溯到向前发生序列并调整其发射时间。

### 1.3 多产品间歇生产过程调度建模

基于CTPN网进行形式化建模, 调度目标就是使初始标识M<sub>0</sub>=(x, y, m.1, m.2, m.3, 0, 0, 0, 0, 0, 0)转移到中止标识M<sub>n</sub>=(0, 0, m.1, m.2, m.3, 0, 0, 0, 0, 0, y)的所有可达树中时间最小的路径。图1和图2中的变迁T7表示达到中止状态以后, 对这一次的产品排序的方案进行评价并返回初始状态。引入方案选择库所和评价变迁可以集成优化方法以选择优化排序方案。

一般假设每类设备中加工单元只有一个, E<sub>i,j,s</sub>表示第i批产品在第j个设备上的期望开始加工时刻, E<sub>i,j,e</sub>表示第i批产品在第j个设备上的期望结束加工时刻, E<sub>i,j,s</sub>和E<sub>i,j,e</sub>对应了图1和图2的开始加工变迁和结束加工变迁的触发时间。t<sub>i,j</sub>表示第i批产品在第j个设备上的加工时间, 对应了图1和图2中加工库所的延迟时间。

调度目标是安排产品排序使得完工时间最小的过程为

$$\text{Min}\{\text{Max}\{E_{i,j,r}\}\} \quad (1)$$

对于UIS多产品间歇生产过程, 第i批产品在第j个设备上的期望开始加工时刻和期望开始完工时刻为:

$$E_{i,j,s} = \text{Max}\{E_{i-1,j,r}, E_{i-1,j,r}\} \quad (2)$$

$$E_{i,j,r} = E_{i,j,s} + t_{i,j} \quad (3)$$

对于ZW多产品间歇生产过程, 第i批产品最早开始加工时刻为:

$$E_{i,l,s} = \text{Max}_j(0, E_{i-1,j,r} - \sum_{a=1}^{j-1} \tau_{i,a}) \quad (4)$$

第i批产品在第j个设备上的期望开始加工时刻和期望开始完工时刻为:

$$E_{i,j-1,r} = E_{i,j,s} = E_{i,l,s} + \sum_{a=1}^{j-1} t_{i,a} \quad (5)$$

## 2 结合局部禁忌搜索的蚁群算法

在图1和图2中由于增加了S1方案选择库所和T7评价变迁, 可以将CTPN模型与优化策略进行集成以选择优化排序方案, 已经有多种优化方法用于求解多产品的排序问题, 如分支定界、模拟退火、遗传算法等方法。近年来, 蚁群算法在组合问题上取得了一系列较好的试验结果, 表明了它是一种比较有前景的方法。本文提出了一种结合局部禁忌搜索的蚁群算法可以改善搜索性能, 加快搜索速度。

### 2.1 蚁群算法

人工蚁群系统<sup>[5]</sup>的原理就是模仿蚂蚁在搜索食物过程中的协同学习机制, 蚂蚁在寻找食物的路径上释放一种分泌物称为信息激素, 一定范围内的其它蚂蚁能感受到信息激素的强度并影响它们向强度高的方向移动。当一些路径上通过的蚂蚁越多, 信息激素的强度也随之增加, 以后的蚂蚁选择这些路径的概率也越大。蚂蚁间就是通过这种信息传递机制, 互相协作, 完成复杂的任务。蚁群算法<sup>[6]</sup>在人工蚁群系统的

基础上增加了全局更新、局部更新规则,使整个算法更有效。

以产品排序的问题说明蚁群算法,假设有N个产品, m只蚂蚁,  $\tau(i, j)$  ( $i, j=1, 2, \dots, N$ )表示顺序加工的产品i和j之间的残余信息量,初始时刻 $\tau(i, j)=C$ (C是常数),蚂蚁k( $k=1, 2, \dots, m$ )在运动过程中根据信息量选择下一个要加工的产品,正在加工的产品r利用以下状态规则选择下一个要加工的产品s:

$$s = \begin{cases} \arg \max_{s \in \text{allowed}(k)} (\tau(r, s) \eta^\beta(r, s)) & \text{if } q \leq q_0 \\ S & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $\text{allowed}(k)$ 表示蚂蚁k选择未加工的产品集合,  $\eta(i, j)$ 表示t时刻加工产品i时选择产品j为下一批加工产品的启发函数,  $q$ 为[0, 1]的随机数,  $q_0 \in (0, 1)$ 为实现变异的参数,  $\beta$ 为参数表示启发函数的重要性。S按以下概率来选择:

$$p(r, s) = \begin{cases} \frac{\tau(r, s) \eta^\beta(r, s)}{\sum_{s \in \text{allowed}(k)} \tau(r, s) \eta^\beta(r, s)}, & j \in \text{allowed}(k) \\ 0, & j \notin \text{allowed}(k) \end{cases} \quad (7)$$

当每只蚂蚁都按状态规则确定了下一步要加工的产品,局部修改规则为:

$$\tau(r, s) = (1-\rho) * \tau(r, s) + \rho * \tau_0 \quad (8)$$

其中:  $\rho \in (0, 1)$ ,  $\tau_0 = (L_{\min} * m)^{-1}$ ,  $L_{\min}$ 为记录中的蚂蚁最小的完工时间。

当所有的蚂蚁全部加工结束后,记录当前循环中所有蚂蚁中的最小完工时间 $L_{\min}$ ,全局修改规则为:

$$\tau(r, s) = (1-\alpha) * \tau(r, s) + \alpha * L_{\min}^{-1}$$

$\alpha \in (0, 1)$

### 2.2 结合局部禁忌搜索的蚁群算法

在搜索初始阶段,各个路径上的信息量差别不是很大,因此需要较长时间才能找到较好路径,因此文献[7]提出了结合2-opt或者3-opt局部搜索的蚁群算法,也就是对每一代最好的蚂蚁所走过的路径进行局部交换。这种局部搜索方法基于3个方面的考虑:(1)避免过早出现停滞;(2)其它位置的顺序关系没有改变,不会出现由于变异太大而产生不可预计的结果;(3)这个计算量比蚂蚁循环一次的计算量要小。试验结果表明该方法有效,但有时会出现较早的停滞现象,为解决此问题,本文提出了结合局部禁忌搜索的蚁群算法。

禁忌搜索是一种人工智能算法,它是局部搜索算法的一个扩展,其重要思想就是标记以前得到的局部最优解到禁忌表中,并在下一次循环中避开它们。禁忌表是一个先进先出的队列,它的两个重要指标是禁忌对象和禁忌长度,禁忌对象就是禁忌表中那些被禁的变化元素,禁忌长度就是记忆禁忌表中对象的个数。令禁忌对象就是加工次序方案,禁忌长度 =  $\text{Int}(\sqrt{\text{产品个数}})$ 。由于禁忌搜索禁止重复以前达到的局部最优状态,因此可以在局部搜索阶段搜索更大的状态空间,防止过早出现停滞,同时也能加快搜索速度。

结合局部禁忌搜索的蚁群算法如下:

- (1) Initialize
- (2) Loop
- (3) 所有的蚂蚁开始准备一次循环
- (4) Loop
- (5) 所有的蚂蚁按状态规则向前走一步
- (6) 执行局部修改规则
- (7) Until 所有蚂蚁完成一个循环

- (8) 记录当前循环中最好的解
- (9) Loop
- (10) 如果该解在禁忌表中,寻找下一个较好的解
- (11) Until 该解不在禁忌表中
- (12) 如果该解不存在,转(15)
- (13) 对该解作2-opt局部搜索
- (14) 如果局部搜索解有所改善,替换当前循环中记录最好解,将该解放入禁忌表中;否则,放弃
- (15) 执行全局修改规则
- (16) Until 中止条件为止

### 2.3 计算示例

表2是结合局部禁忌搜索的蚁群算法与蚁群算法的比较,  $N \times M$ 表示N个产品经过M个设备,每个例子测试50次。ACO表示用蚁群算法, L-ACO表示用结合禁忌局部搜索的蚁群算法。  $m=30$ ,  $q_0=0.9$ ,  $\rho = \alpha = 0.1$ ,  $\beta = 2$ , 启发函数为  $1/(T_{ij} + \lambda * T_j)$ ,  $T_{ij}$ 为第j批产品加工时设备的空闲时间,  $T_j$ 为第j批产品的加工时间和,  $\lambda \in (0, 1)$ , 这里取0.5。当问题规模增大时,结合局部搜索的蚁群算法测试的结果优于蚁群算法的测试结果。

表2 结合局部禁忌搜索的蚁群算法与蚁群算法的比较

N×M	UIS		UIS		ZW		ZW	
	Proportion of best		Mean deviation of best		Proportion of best		Mean deviation of best	
	ACQ	L-ACO	ACO	L-ACO	ACQ	L-ACO	ACO	L-ACO
10×3	100	100	0.0	0.0	100	100	0.0	0.0
15×3	100	100	0.0	0.0	100	100	0.0	0.0
20×3	98	98	0.1	0.1	98	100	0.09	0.0
30×3	92	98	0.16	0.09	92	94	0.15	0.12
50×3	92	94	0.12	0.09	90	94	0.1	0.08

单位: %

### 3 结论

本文利用CPTN准确地描述了多产品批处理生产过程的时间顺序、事件并发和资源共享,建立数学模型,引入评价变迁和方案库所,可嵌入各种优化方法求解UIS和ZW多产品间歇过程排序问题。通过示例计算表明本文的结合局部禁忌搜索的蚁群算法改善了蚁群算法的搜索性能。UIS和ZW间歇调度问题分别是有中间存储设备和无中间存储设备中的一般化的问题,因此该建模和优化方法可方便地扩展到其它中间存储策略的间歇调度问题中,具有良好的应用前景。

### 参考文献

- 1 王 举,袁希刚,陈中州.用于多产品间歇化工过程排序的模拟退火算法[J]. 化学学报, 2000, 51(6): 751-756
- 2 Jayaraman V K. Ant Colony Framework for Optimal Design and Scheduling of Batch Plants [J], Computers Chem. Engng, 2000,24: 1901-1912
- 3 Kuriyan K, Reklaitis G V. Scheduling Network Flowshops so as to Minimize Makespan [J]. Computers Chem. Engng, 1989, 13(1/3):187
- 4 Gu Tianlong, Cai Guoyong. The Short Term Scheduling Technique Batch on Timed Petri-Net Representation for Multi\_Product Batch Plants [J]. Control Theory and Applications, 2000, 17(6):933-936
- 5 Dorigo M, Maniczzo V, Colomi A. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents [J]. IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics, 1996,26(1):28-41
- 6 Dorigo M, Gambardella L M. Ant Colonies for the Travelling Salesman Problem[J]. Biosystems, 1997,43:73-81
- 7 Dorigo M, Luca M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Travelling Salesman Problem[J]. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 1997,1(1):53-66