

# 多产品多级连续化工过程生产调度的研究

伍联营 胡仰栋 安维中 徐冬梅

(中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266003)

**摘要:**对多产品多级连续化工过程的生产调度问题进行了研究,考虑了设备清洗和设备生产效率下降对生产过程的影响。依据该过程具有组合和连续性特点,将该调度模型归结为一混合整数非线性规划问题(MINLP),以利润最大为目标,采用改进的遗传算法对该模型进行了求解。用一个三产品两级连续过程的例子说明了该算法的有效性。

**关键词:**化工过程;遗传算法;生产调度;多级连续过程

**中图分类号:**TQ018

**文献标识码:**A

**文章编号:**0253-4320(2004)S2-0068-03

## Study on production scheduling of multiproduct multistage continuous chemical process

WU Lian-ying, HU Yang-dong, AN Wei-zhong, XU Dong-mei

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

**Abstract:** The problem of scheduling of multi-product multi-stage continuous chemical process, which involves cleaning of unit and the yield decay, is studied. A mixed integer nonlinear programming (MINLP) model targeting the maximum the profit is proposed in terms of process characteristic, which can be solved by the modified genetic algorithm (MGA) developed by us. An example demonstrated the effectiveness of the model and algorithm.

**Key words:** chemical process; genetic algorithm(GA); production scheduling; multistage continuous process

多产品间歇化工过程的生产调度已得到广泛的研究<sup>[1-2]</sup>,但连续化工过程的多产品多级生产调度问题,尤其是考虑设备清洗和设备生产效率随时间下降情况的文献较少,而这些问题在实际的生产过程却是经常遇到的,如聚合产品的生产、造纸工业和炼油等生产过程。多产品连续化工过程的生产调度具有组合生产特性和连续生产特性,其过程的特点是:当由一种产品转向另一种产品时,由过渡料和低价值或无价值的中间产品产生,这无疑增加了生产成本。因此对这一问题的研究已经引起学者和企业的高度重视。

秦宏启等<sup>[3]</sup>采用遗传算法对多产品连续化工过程生产调度进行了研究,并对交叉和变异算子进行了改进,但其采用二进制编码对求解大规模问题时耗费的计算机资源大和计算时间长;Epstein<sup>[4]</sup>及 Sheikh, Zubari, Haq 和 Budair<sup>[5]</sup>提出了带有清洗过程的最优调度问题,但其只局限于单级生产过程;Jain 和 Grossmann<sup>[6]</sup>研究了单级具有多个平行单元的生产调度问题,并将该过程归结为一个 MINLP 进行求解;Alle 等<sup>[7-8]</sup>采用数学规划法对带有清洗的多级多产品的周期调度问题进行了求解,其模型中的变量和约束条件数量巨大,求解计算时间长。

遗传算法在求解不可微、非线性、非凸和多峰的

复杂问题时具有优越性,但传统的遗传算法已提前收敛,且单一编码方式在描述复杂问题时往往存在较大的难度。本文采用混合编码的遗传算法将模型中的序列变量和连续变量同时进行编码,使遗传算法的应用得到了扩展。

## 1 多产品多级连续化工过程的生产调度

### 1.1 问题描述

$N$  个产品在  $M$  台设备上连续生产,设备之间由中间储罐连接,最后一台设备之后有最终储罐,最终储罐应能满足在生产周期内所有产品需求量的总和。对每一种产品都有一个需求速率,由于设备的生产效率随生产时间的延长会有所下降,因此各产品在生产线上的生产速率和生产成本都是时间的函数,而产品的转移时间、转移费用和清洗成本都与产品的生产顺序有关。该问题通常以总生产成本最小或利润最大为目标,进而确定产品的生产顺序、生产周期以及每种产品在生产周期的生产时间。

### 1.2 生产调度模型

Alle 等对多级多产品连续化工生产过程的生产调度问题进行了研究,但其考虑的因素过多,所建立的数学模型非常复杂。本文针对连续生产过程的特点,对该模型进行了合理的简化,并作如下几点假

设:

- (1) 每种产品都以同样的顺序经过所有设备;
- (2) 储罐的容量是无限的, 储存费用依赖于中间产品和最终产品的数量;
- (3) 每个生产周期内每种产品只生产一次;
- (4) 每台设备都是连续操作, 且设备的生产速率可以在一定的范围内变化。

这一调度过程的数学模型描述如下:

$$\begin{aligned} \max \text{ Pro} &= \sum_i (p_i w_{im} - C_{fi} \cdot F_i - \sum_m Cl_{im} - \sum_j Ctr_{ij}) \\ \text{s.t. } W_{im} &= G_{im} TP_{im} R_{im}, i = 1, 2, \dots, N, m = 1, 2, \dots, M \\ R_{im} &= a_i \text{EXP}(-b_i TP_{im}) \\ W_{im} &\geq d_i T_k \\ H &= \sum_k T_k \\ \sum_m \frac{w_{im}}{H} &= d_i \\ T_k &\geq 0, W_{im} \geq 0, H > 0 \end{aligned}$$

其中  $p_i$  是产品  $i$  单位质量的生产成本,  $d_i$  是其需求速率,  $W_{im}$  是在一个生产周期内产品  $i$  在设备  $m$  上的产量,  $R_{im}$  为产品  $i$  在设备  $m$  上的生产速率,  $TP_{im}$  为产品  $i$  在设备  $m$  上的生产时间,  $C_{fi}$  为生产产品  $i$  的原料的单位成本,  $F_i$  为原料的流率,  $Cl_{im}$  为清洗费用,  $Ctr_{ij}$  为转移费用,  $a_i$  和  $b_i$  为系数。

## 2 改进的遗传算法

运用遗传算法求解组合优化问题的难点在于编码问题。传统二进制串编码对很多工程问题难以直接描述, 且在问题规模较大时所占用的资源大和计算时间长。近年来, 随着研究的不断深入, 出现了实数编码和整数编码, 可以解决某些约束优化和组合优化问题。笔者采用了混合编码的方法来表达自己的解, 即将序列变量与实数变量同时编码, 如下所示:

$$\{(p_1, p_2, \dots, p_N), (t_1, t_2, \dots, t_N)\}$$

(上接第 67 页)

料平衡, 使公司领导层、生产管理層和生产操作层共享同一数据, 使生产指挥和决策更加快捷、准确, 弥补了 ERP 系统在炼油企业实施中不能实时反映生产过程中物流信息的不足, 成为炼油企业生产管理不可缺少的组成部分。

目前金陵分公司原油供应和产品销售基本由中国石化总部统一部署和计划, 如何降低生产环节的成本是企业实现利润最大化的一个重要任务, 金陵

其中  $(p_1, p_2, \dots, p_N)$  为产品生产顺序的自然表达, 它代表了所有产品的生产序列;  $(t_1, t_2, \dots, t_N)$  为给定的生产序列各产品的生产时间。采用这种编码方法, 在进化过程中其遗传算子(交叉、变异)对 2 种编码应采用不同的方法进行, 以保证种群的合法化。笔者对序列变量采用部分映射交叉 (Partially Matched Crossover Operator, PMX) 和反转变异; 对十进制变量采用算术交叉和非均匀变异。现将交叉和变异的方法简要介绍。

### (1) PMX 交叉。

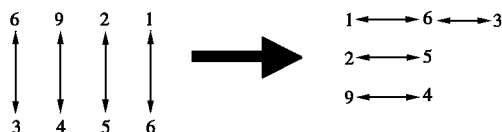
#### ① 随机选择子串

父代 1: 1 2 3 4 5 6 7 8 9  
 父代 2: 5 4 6 9 2 1 7 8 3

#### ② 交换双亲中的子串

原始父代 1: 1 2 6 9 2 1 7 8 9  
 原始父代 2: 5 4 3 4 5 6 7 8 3

#### ③ 确定映射关系



#### ④ 用映射关系将后代合法化

父代 1: 3 5 6 9 2 1 7 8 4  
 父代 2: 2 9 3 4 5 6 7 8 1

(2) 算术交叉。对任意的 2 个个体(父代)交叉后的个体(子代)为:

$$\begin{aligned} V'_1 &= V_1 + (1 - \lambda) V_2 \\ V'_2 &= V_2 + (1 - \lambda) V_1 \end{aligned}$$

(3) 反转变异。在选择变异的染色体中随机的选取 2 点, 然后将 2 点之间的基因反转, 得到新个体, 即:

$$1 \ 2 \ \boxed{3 \ 4 \ 5 \ 6} \ 7 \ 8 \ 9 \longrightarrow 1 \ 2 \ \boxed{6 \ 5 \ 4 \ 3} \ 7 \ 8 \ 9$$

分公司 MES 为生产经营管理提供了一个重要工具, 为企业 ERP 系统提供了坚实的数据基础, 将生产操作层、生产管理層和经营管理層 3 个层面的信息集成在一起, 形成企业生产管理平台, 为炼油企业精细化生产管理提供了支持。

### 参考文献

[1] 张志樵, 等. 实时数据库原理及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2001. 99 - 142. ■

(4)非均匀变异。对于给定的父代个体 $(\Delta t_1, \dots, \Delta t_x, \dots, \Delta t_N)$ ,若它的 $\Delta t_x$ 基因被选来变异,则生成的后代为: $(\Delta t_1, \dots, \Delta t'_x, \dots, \Delta t_N)$ 。而 $\Delta t'_x$ 随机地按如下 2 种可能变化

$$\Delta t'_x = \Delta t_x + \Delta(t, \Delta t_x^u - \Delta t_x)$$

$$\Delta t'_x = \Delta t_x - \Delta(t, \Delta t_x - \Delta t_x^l)$$

其中 $\Delta t_x^u, \Delta t_x^l$ 分别是 $\Delta t_x$ 的上、下界

$$\Delta(t, y) = y \cdot r \cdot (1 - t/T)^b$$

$r$ 是 $[0, 1]$ 间的随机数, $T$ 为最大代数, $t$ 为当前的迭代次数, $b$ 是确定非均匀度的参数。

### 3 举例

3 种产品在包含有 2 台设备的生产线上进行连续周期生产,3 种产品都可用相同的原料制造,在每个生产周期内每种产品只生产一次,原材料的单位价格为 30 美元/t,  $a_i = 1, b_i = 1$ ,其他所需数据如表 1 和表 2 所示。

表 1 产品生产的相关数据

产品	$P_i/$	$G_{i1}/$	$G_{i2}/$	$d_i/$	$Cf_i/$	$Cl_{i1}/$	$Cl_{i2}/$
	美元·t <sup>-1</sup>	t·d <sup>-1</sup>	t·d <sup>-1</sup>	t·d <sup>-1</sup>	美元·t <sup>-1</sup>	10 <sup>3</sup> 美元	10 <sup>3</sup> 美元
A	110	120	75	9	25	5.0	2.50
B	90	110	60	12	25	6.5	3.25
C	80	130	80	15	25	7.5	3.75

表 2 产品的转移时间和转移费用

产品	转移时间 $\tau_{ij}/d$			转移时间 $\tau_{ji}/d$			转移费用/10 <sup>3</sup> 美元		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
A	0	2.5	4	0	2.5	4	0	17.5	20
B	2.5	0	3.5	3.5	0	3	15	0	15
C	4	2.5	0	3.5	3	0	20	12.5	0

采用改进的遗传算法,对上面的例子进行计算,取种群数为 50,交叉和变异率分别为 0.8 和 0.01,在第 155 代收敛到最优解,计算结果与文献[7]比较如

表 3 所示。

表 3 结果比较

	文献值	本文计算值
生产顺序	A—C—B	A—C—B
生产费用(美元·d <sup>-1</sup> )	3363	3258
生产利润(美元·d <sup>-1</sup> )	931	953

由表可以看出,本文采用改进的遗传算法得到的生产费用小于文献中的值,这可能是由于文献中允许单个产品在一个生产周期内可生产多次,并且每次都要进行清洗,故增加了清洗费用;本文只要求在产品转换时才进行设备清洗,因而降低了生产费用,最终的利润也高于文献中的值。

### 4 结论

对多产品多级连续化工过程的生产调度问题进行了研究,考虑了设备清洗和生产效率随时间下降的问题,并建立了一个 MINLP 模型,采用改进的遗传算法对该问题进行了求解,并与文献中的结果进行了对比,结果表明本文采用的方法是可行和有效的。

### 参考文献

- [1] 袁一,郭佩俊.[J].齐齐哈尔轻工学院学报,1995,11(4):14-23.
- [2] 王举,袁希钢,陈中州.[J].化工学报,2000,51(6):751-757.
- [3] 秦宏启,王克峰,袁一.[J].大连理工大学学报,1997,36(7):643-648.
- [4] Epstein N.[J].Canadian Journal of Chemical Engineering,1979,57:659-661.
- [5] Sheikh A K, Zubari S M, Haq M U, et al.[J].Transactions of the ASME,1996,118:306-312.
- [6] Jain V, Grossmann I E.[J].American Institute of Chemical Engineering Journal,1998,44:1623-1636.
- [7] Alle A, Papageorgiou L G, Pinto J M.[J].Computers and Chemical Engineering,2004,28:3-15.
- [8] Alle A, Pinto J M.[J].Ind Eng Chem Res,2002,41:2689-2704. ■

## 中国石化列世界 500 强第 53 位

美国《财富》杂志近日公布了按营业收入排序的 2003 年度全球 500 强企业名单。

中国石化集团公司列第 53 位,比上年度排名前进了 17 位。