

# Model and Algorithm of Optimal Production Scheduling for Polyamide Filament Plants

Jin Hui<sup>1</sup>, Xiaokun Miao<sup>1</sup>, Yueling Zhao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Automobile and Transportation Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou, China

<sup>2</sup>College of Electric Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou, China

Email: jinhui5868@163.com, 316770717@qq.com, zhao7267@163.com

**Abstract:** Production scheduling optimization is a difficult problem in polyamide filament production processes. A mixed-integer linear programming (MILP) model for cyclic schedules in polyamide filament plants is formulated. The objective function of the problem is maximization of the profit. A tabu search (TS) algorithm and a hybrid intelligent optimization algorithm are used to solve the problem in order to gain better results. The TS is good at the local search, while variable depth search (VDS) is capable to expend the searching space, and the advantages of these two methods are fully combined in our algorithm. The effectiveness of the proposed model and methods are verified with the data collected from a real-world manufacturing facility.

**Keywords:** polyamide filament; production scheduling; MILP; tabu search; variable depth search

## 锦纶长丝厂优化排产模型与算法

金 辉<sup>1</sup>, 苗晓坤<sup>1</sup>, 赵越岭<sup>2</sup>

<sup>1</sup>辽宁工业大学汽车与交通工程学院, 锦州, 中国, 121001

<sup>2</sup>辽宁工业大学电气工程学院, 锦州, 中国, 121001

Email: jinhui5868@163.com, 316770717@qq.com, zhao7267@163.com

**摘 要:** 锦纶长丝排产优化是一个生产难题。本文建立了以效益最大化为优化目标的混合整数规划 (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) 问题模型。提出并设计了禁忌搜索 (Tabu Search, TS) 与变深度搜索算法 (Variable Depth Search, VDS) 的改进的算法, 它融合了禁忌搜索的较强局部搜索能力及变邻域结构扩展邻域搜索范围的能力。采用实际生产数据, 对所建立的 MILP 模型及改进的算法进行了实验研究, 实验结果验证了本文建立的模型及所提出算法的有效性。

**关键词:** 锦纶长丝; 排产; MILP; 禁忌搜索算法; 变邻域搜索

### 1 引言

随着市场经济的发展和改革的不断深入, 市场竞争日趋激烈, 多品种、多工序和小批量生产已成了现代制造业的主要生产特点, 这就迫使企业不断改进其生产和管理模式, 采用先进的、科学的方法和手段组织生产, 合理安排工序, 高效地利用资源, 降低生产成本, 使企业获得较高的经济效益, 提高企业的竞争力。锦纶长丝生产装置具有大型化、生产流程的连续化、产品质量的精细化、生产的柔性化等特殊特性, 需要在同一套生产装置中进行不同功能产品或不同规格之间切换, 这就带来了不可避免的损失: 生产停顿、生产时间减少、过渡料产生、

此项工作得到辽宁省博士科研启动基金资助, 项目批准号: 20071096

原辅料损失、更换纺丝组件损失以及人力资源浪费等。为了提高企业的经济效益, 要科学组织生产, 合理安排每种产品的生产顺序, 尽可能避免纺丝组件的非正常更换, 减少产品切换时间及切换过程产生的废料量, 降低产品库存费用, 这是一个非常困难的批处理调度问题<sup>[1]</sup>, 它直接影响生产效率。目前, 实际生产中主要是根据调度员的经验进行排序, 然而, 随着产品数的增加, 问题变得越来越复杂, 只靠经验难以保证最优性。

在早期的文献中, Pinto and Grossmann, Alle and Pinto<sup>[2,3]</sup>基于连续时间, 建立了多产品, 多阶段的连续过程工厂的生产周期调度模型。Alle, Papageorgiou and Pinto<sup>[4]</sup>建立了多产品, 多阶段的连续过程工厂的生产和清洗的周期调度模型。对

Pinto and Grossmann, Alle and Pinto 的模型进行了扩展，考虑中间产品及最终产品库存成本。提出了基于外部近似（Outer Approximation）和广义 Benders 分解技术的解决问题方法。

本文研究了一类锦纶长丝生产排产优化问题，建立了该问题的数学模型，用改进的禁忌搜索算法求解，该算法融合了禁忌搜索较强的局部搜索能力和变邻域结构扩展邻域搜索范围的能力。通过某大型石化企业实际生产数据的计算结果证明了模型和算法的有效性。

## 2 问题描述和数学模型

### 2.1 问题描述

锦纶长丝企业属于典型的流程工业企业，具有如下一些特点：1)生产工序多，工艺复杂，资源约束，次序相关的调整；2)采用连续生产方式，不可以中断生产，自动化水平较高；3)机械运转设备多，易损件，消耗件量大且比较昂贵。

在锦纶长丝产品生产过程中，从一个品种规格转到另一品种规格常常需要更换纺丝组件或重新设定工艺参数，要花费一定的调整时间。转产的方案不同，花费的时间也不同。企业追求的目标是使调整时间最短，以提高设备作业率和生产效率，降低生产成本。如果将具有相同或相近参数的产品合同安排在一起生产，则不需要或只需要较少的调整时间，较少的纺丝组件更换，从而达到优化排产的目的。锦纶长丝生产调度优化问题可描述为：在一个给定的时间周期内，考虑各种费用和条件，如：切换费用，时间，过渡料等，决定每种产品在什么时候生产，生产多少，以使得总的费用最小。

### 2.2 数学模型

#### 2.2.1 基本假设

1) 每种产品以相同顺序经过所有阶段（flowshop 工厂）；2) 只考虑设备资源限制，不考虑其他资源限制；3) 每种产品的生产率一定，订单在各工序的加工时间，各订单的交货期和需求量子已知；4) 企业按照订单生产。生产周期 3 个月。

#### 2.2.2 决策变量

1) 每种产品生产顺序；2) 每种产品的开始生产时间和结束时间。

### 2.2.3 目标函数和约束条件

目标函数

$$\text{Maxprofit} = \sum_i P r_i W_{iM} - \sum_i \sum_j \text{Ctr}_{ij} Z_{ij} - \frac{1}{2} \sum_i (\gamma_{im} P_{im} - \frac{W P_{im}}{Tc}) T p_{im} C_i - \sum_i r_{im} P_i W_{iM} \quad (1)$$

约束条件：顺序约束

$$\sum_i Z_{ij} = 1, \quad \forall j \quad (2)$$

$$\sum_j Z_{ij} = 1, \quad \forall i \quad (3)$$

物料平衡约束

$$W_{im} = \gamma_{im} T p_{im}, \quad \forall i, m \quad (4)$$

过渡消耗约束

$$Ct \geq \sum_i \sum_j Z_{ij} \text{Ctr}_{ij} \quad (5)$$

时间约束，切换时间约束

$$T s_{im} \leq T s_{i,m+1}, \quad \forall i, m = 1, 2 \quad (6)$$

$$T s_{im} + T p_{im} \leq T s_{i,m+1} + T p_{i,m+1}, \quad \forall i, m = 1, 2 \quad (7)$$

$$Tc \geq \sum_i T p_{im} + \sum_i \sum_j \tau_{ijm} z_{ij}, \quad \forall m \quad (8)$$

需求约束：生产与需求平衡约束

$$d_i T p_i \leq I_i, \quad \forall i \quad (9)$$

$$I_i \geq 0 \quad (10)$$

装置的生产能力约束

$$\gamma_{is} \leq \gamma_{im} \leq \gamma_{il} \quad (11)$$

式(1)是模型的目标函数，即最大化效益。其中，第一项是产品的生产（销售）收入，第二项为转换费用，第三项为库存费用，最后一项是原料成本。

式(2)表示：对任意产品  $i$ ，有且仅有一个产品  $j$  在其之后生产；式(3)表示对任意产品  $i$ ，有且仅有一个产品  $i$  在其之前生产；式(4)表示了生产的产品量与生产时间成正比；式(5)表示调度中的转换消耗；式(6)示对任何一种产品，后一阶段的开始处理时间不能先于它之前的开始处理时间；式(7)表示对任何一种产品，后续工序的结束时间不可能先于其前道工序的结束时间；式(8)表示生产周期是所有阶段(工

序) 中最长的处理时间; 式(9)表示客户需求必须被满足; 式(10)表示库存不为负; 式(11) 表示装置的生产能力约束。

### 2.2.4 符号说明

1) 集合:

$i, j = 1, 2, \dots, NP$  —— 产品;

$m = 1, 2, \dots, M$  —— 阶段

2) 连续变量:

$Tp_{im}$  —— 产品  $i$  在阶段  $m$  的加工时间;

$Ts_{im}$  —— 产品  $i$  在阶段  $m$  加工的开始时间

3) 二值变量:

$z_{ij}$  —— 设  $z_{ij}$  为 0、1, 如果产品  $i$  紧跟着产品  $j$  后生产  $z_{ij} = 1$ , 否则  $z_{ij} = 0$

4) 参数:

$Tc$  —— 生产周期;

$Ctr_{ij}$  —— 产品  $i$  和产品  $j$  之间的切换消耗;

$d_i$  —— 产品  $i$  的需求;

$Pr_i$  —— 产品  $i$  的售价;

$P_i$  —— 原料的采购价;

$W_{im}$  —— 产品  $i$  在阶段  $m$  生产的总量;

$C_i$  —— 单位时间单位产品的平均存储费用;

$\gamma_{is}$  —— 产品  $i$  的最大生产能力;

$\gamma_{il}$  —— 产品  $i$  的保证生产速率。

## 3 求解算法和求解过程

### 3.1 求解算法

本文所研究的锦纶排产优化问题是随机组合优化问题, 属于 NP-hard 问题, 难以用精确算法求解最优解, 应当采用 Metaheuristic 算法求取问题的近优解。本文设计了求解锦纶排产优化问题的禁忌搜索算法和变邻域搜索算法相结合的混合算法。

禁忌算法属于现代优化算法<sup>[5]</sup>, 是局部邻域搜索法的推广。禁忌搜索算法的基本思想是: 随机给出一个初始解作为当前解, 在当前解的邻域中确定若干候选解; 如果某一候选解对应的目标值满足藐视规则, 则忽略其禁忌特性, 并用它替换当前解和全局最优状态(best so far), 然后将它加入禁忌表,

同时更新禁忌表。如果不存在上述解, 选择候选解中的非禁忌的最佳状态为当前解, 同样将其相应的对象加入禁忌表, 并更新禁忌表。如此重复上述过程, 直至满足终止准则。禁忌搜索法在解决组合最优化问题方面应用广泛。

变邻域搜索是指通过产生一系列相关联的基本移动来生成一个复杂的复合移动的方法。变深度搜索就是指对一个解实施通过变深度搜索产生的复合移动而得到的解的集合。变邻域搜索主要采用复合移动来实现邻域的变化。通过适当改变邻域大小, 从而搜索到更广阔的空间。它避免了单一移动的弱点, 加强了邻域搜索的能力, 因而能够得到较好的解<sup>[6]</sup>。变深度方法主要分两种实现方式, 分别是排除链方法和筛选-分支方法。

传统的禁忌算法解决问题时, 搜索的最终结果依赖于当前解的选取。由于每次搜索过程中只有一个当前解, 搜索时也只是一个解移到另一个解, 这样搜索范围的覆盖率较低, 算法的稳定性和全局搜索能力受到了很大限制。为了克服禁忌搜索算法对初始解的依赖, 搜索到广阔的空间, 加强邻域搜索的能力, 提高解的质量。本研究尝试在禁忌搜索框架之下, 改变常规邻域, 使用变深度搜索算法来增强算法的局部搜索能力<sup>[7]</sup>。在 TS 算法中嵌入变深度搜索算法是通过采用复合移动来实现邻域的变化。复合移动是由多个子移动组成。子移动可以是一种移动方式, 也可以是两种移动方式的混合。两种移动方式结合使用, 可以避免单一移动的弱点, 加强邻域搜索的能力, 因而能够得到更好的解<sup>[8]</sup>。

### 3.2 求解过程

产品相关数据见表 1-表 4。

表 1. 产品相关数据(1)

产品编号	原料价格 (万元/吨)	产品销售价格 (万元/吨)	产品单耗 (千克/千克)
A	1.1	1.8	1.011
B	1.5	3.6	1.013
C	2.0	4.2	1.018
D	2.0	4.5	1.017
E	1.4	3.1	1.013
F	2.0	4.0	1.016
G	1.5	3.8	1.015
H	1.7	3.8	1.015

**表 2. 产品相关数据(2)**

产品编号	需求 (吨)	生产速度 (千克/小时)
A	200	720
B	150	680
C	450	500
D	250	500
E	100	500
F	600	600
G	150	600
H	200	650

**表 3. 转换时间 (小时)**

转换时间	A	B	C	D	E	F	G	H
A	0	5	5	5	5	4	4	8
B	5	0	5	5	5	4	4	8
C	5	5	0	8	5	8	5	8
D	4	4	5	0	4	8	5	5
E	5	5	5	5	0	8	5	5
F	5	5	5	5	4	0	5	8
G	4	4	5	8	4	8	0	8
H	8	8	8	8	8	8	8	0

**表 4. 转换费用 (元)**

转换费用	A	B	C	D	E	F	G	H
A	0	7974	11374	11950	8910	6910	7974	12446
B	6814	0	11374	11950	8910	6910	3214	12446
C	6814	7974	0	11950	8910	10510	6830	12446
D	3214	3214	8846	0	5310	10510	6830	8846
E	6814	6830	11374	8350	0	10510	8465	8846
F	6814	6830	11374	8350	8846	0	8465	10510
G	3214	7974	11374	11950	8910	10510	0	10587
H	17446	13694	17446	13694	13694	17446	12465	0

以生产 8 种产品为例, 说明算法的设计过程。

**初始解:** 禁忌搜索算法对初始解有很强的依赖性, 一个较好的初始可行解可使禁忌搜索在邻域解中搜索到更好的解, 而一个差的初始解则会降低算法的收敛速度。本研究获得初始解的方法: 首先从所有待选产品中, 挑取库存费用最小的产品作为先生产的产品。然后从剩下的产品中依次挑选与前一

个生产产品转换费用最小的产品成为接下来生产的产品, 直到挑完最后一个产品。这里首先选择原料切片和成品价格较低的品种作为先生产的产品。

**邻域结构:** 通过三种移动构造了插入式、交换式邻域和块移动式邻域。

**块移动式邻域:** 在当前解中随机选择一个产品, 将解中包括该产品最长的片段看作块, 将块看成一个产品整体的移动到一个新的位置形成新的解, 所有可能形成的新解组成了当前解关于这个产品的整体移动式邻域。

**禁忌长度:** 禁忌长度是禁忌对象在不考虑藐视准则的情况下不允许被选取的最大次数, 禁忌长度的选取与问题特征和经验有关, 它决定了算法的复杂度。本研究通过大量实验确定禁忌长度为 7。

**藐视准则:** 在禁忌算法中, 可能会出现候选解全部被禁忌, 藐视准则可使某状态解禁, 以实现更高效的优化性能。本研究采用适应值法, 并且将目标函数直接作为适应值函数。

**终止准则设计:** 本文结合锦纶长丝的实际生产情况, 算法的终止准则设置了两个: 1) 若程序运行超过最大迭代步数 (99 次), 则算法终止; 2) 只要连续 16 次没有得到更好的改进解则算法终止。

改进的 TS 算法和 TS 算法求解的最优解和结果比较见表 5。

**表 5. TS/VDS 结果和 TS 结果与初始解的比较**

问题编号	初始目标值	TS		TS/VDS	
		最好值	改进量 (%)	最好值	改进量 (%)
1	2031.42	2108.90	3.81	2125.45	4.62
2	2137.24	2210.22	3.41	2305.21	7.85
3	1948.87	2029.42	4.13	2084.34	6.95
4	1864.33	1930.32	3.53	2003.54	7.46
平均			3.72		6.72

表 5 中对于给定计划期内生产 8 种产品时的 4 组不同数据进行了测试, 结果表明, 对于同样的数据, TS 方法和 TS/VDS 方法都能够改进初始解, 但从运行结果的质量来看 TS/VDS 改进效果好于单纯应用 TS 方法。对每组数据 TS/VDS 算法均能够对初始解有较大的改进, 最小的改进量为 4.62%, 最大的改进量为 7.85%, 平均改进量达到 6.72%。

## 4 结论

针对锦纶长丝生产多阶段多品种连续生产的特点，建立了混合整数规划模型，提出了改进的禁忌搜索算法，运用了复合移动邻域的结构，从而使得算法具有很高的搜索效率。通过实际生产数据对算法性能进行了测试。实验结果证明了模型和方法的有效性和实际应用价值。

## References (参考文献)

- [1] Silver, E.A. Inventory Management and Productions Planning and Scheduling (Third Edition) [M]. John Wiley & Sons, 1998. 149-154.
- [2] Pinto J M, Grossmann I. E, Optimal Cyclic Scheduling of Multistage Multiproduct Plants [J], *Comput. Chem. Eng.*, 1994, 18(9), P 797-816.
- [3] Alle A , Pinto J M, Mixed-Integer Programming Models for the Scheduling and Operational Optimization of Multiproduct Continuous Plants[J], *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2002, 41(11), P 2689-2704.
- [4] Alle A, Papageorgiou L. G, Pinto J M, A Mathematical Programming Approach for Cyclic Production and Cleaning Scheduling of Multistage Continuous Plants[J], *Computers and Chemical Engineering*, 2004,28 (1-2), P3-15.
- [5] Burak E, Sandra D E, Jain P,A Tabu Search Algorithm for the Flowshop Scheduling Problem with Changing Neighborhoods[J], *Computers & Industrial Engineering* ,2008, 54 (1), P1-11.
- [6] Pierre Hansen, Nenad Mladenovi'c, Dragan Uroševi'c, Variable Neighborhood Search and Local Branching[J], *Computers & Operations Research*, 2006, 33 (10), P3034-3045.
- [7] Kengo K, Akihiro H, Hiroyuki N. An Effective Local Search for the Maximum Clique Problem [J], *Information Processing Letters*, 2005, 95 (5), P503-511.
- [8] Song G J, Modeling for Scheduling Problem of Continuous Galvanized Coils and its System Development [D].Shenyang: Northeastern University, 2008.  
宋国娇, 钢卷连续热镀锌生产排程优化模型与系统[D], 沈阳: 东北大学, 2008.