

文章编号: 1001-0920(2009)09-1331-04

基于 TS/ VDS 算法的涤纶短纤维生产调度优化

金 辉^{1,2}, 王建辉¹, 王大志¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004; 2. 辽宁工业大学 汽车与交通工程学院, 辽宁 锦州 121001)

摘 要: 采用禁忌搜索(TS)/变深度搜索(VDS)混合算法对涤纶短纤维生产调度优化问题进行优化. 混合算法通过改变常规 TS 算法邻域, 采用变深度搜索技术增强了算法寻优能力. 某大型石化企业实际数据的实验结果表明, 该算法在寻优能力和求解时间上比常规 TS 算法更加有效, 能够在更短的时间内获得满意解, 对于解决多产品多阶段连续生产调度问题具有实用价值.

关键词: 生产调度; 涤纶短纤维; 禁忌搜索算法; 变深度搜索算法

中图分类号: TP29; C935

文献标识码: A

Optimal scheduling in production of polyester staple fiber based on a TS/ VDS algorithm

JIN Hui^{1,2}, WANG Jianhui¹, WANG Dazhi¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. College of Automobile and Transportation Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China.

Correspondent: JIN Hui, E-mail: jinhui5868@163.com)

Abstract: Production scheduling optimization is a difficult problem in polyester staple fiber production processes. Therefore, a hybrid tabu search (TS)/variable depth search (VDS) algorithm is built, which uses VDS techniques to improve the searching ability of the algorithm by changing the regular TS neighborhood structure. Computational experiments with respect to a real-world large-scale petrochemical manufacturing facility show that the proposed algorithm is better in searching ability and solving time. A satisfactory solution can be obtained in reasonable computation time, which can be used to solving the widely production optimization problems such as the multistage multi-product continuous plants problem.

Key words: Production scheduling; Polyester staple fiber; Tabu search; Variable depth search algorithm

1 引 言

切片纺丝生产涤纶短纤维的企业生产特点是批量小、品种多、以差别化纤维生产为主. 这种产品结构要求在一套装置上生产不同产品, 因而存在产品切换问题. 特别地, 当生产的产品纤度变化较大或颜色、截面变化较大时需要更换纺丝组件, 这往往会带来不可避免的损失——过渡料和废料的产生、正常生产时间的减少、原辅料的损失、人力资源的浪费. 一条生产线上的生产从一个产品到另外一个产品变化时, 生产转换时间和准备费用是给定的. 而在品种切换过程中生产出来的不属于任何一种牌号的产品, 称为过渡料. 过渡料的价格仅为正品价格的三分

之一. 各品种之间切换时, 切换时间越长, 过渡料就越多. 涤纶短纤维在计划期内要生产多种产品, 产品生产顺序不同其切换费用也不同, 即产品的切换费是顺序依赖的, 所以合理地确定每种产品生产顺序, 可以大大提高企业生产效率, 降低企业的各种资源浪费, 从而在市场经济中占据竞争优势. 这是一个非常困难的多产品生产调度问题, 即 NP-hard 问题^[1].

在早期的文献中, Pinto 等^[2]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(混合整数非线性规划和混合整数线性规划). Alle^[3]建立了多产品、多阶段的连续过程工厂生产和清洗的周期调度模型. 文献[4]对以上模型进

收稿日期: 2008-09-12; 修回日期: 2008-12-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474040).

作者简介: 金辉(1963—), 女, 辽宁锦州人, 教授, 博士生, 从事智能控制理论与应用的研究; 王建辉(1957—), 女, 辽宁鞍山人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制理论与应用等研究.

行了扩展,考虑中间产品及产品库存成本,提出了基于外部近似和广义 Benders 分解技术的解决问题的方法.

本文根据实际生产过程特点,建立了一个 MILP 数学优化模型,并提出一个 TS/VDS 算法来求解该模型.算法在 TS 算法中嵌入 VDS,拓展了 TS 算法迭代初期的静态寻优能力,为搜索到更好解提供可能^[5].

2 问题描述和数学模型

2.1 问题描述

涤纶短纤维生产主要分为前纺和后加工 2 个阶段.在前纺阶段,涤纶切片经干燥、纺丝卷绕成为中间产品至盛丝桶中.装满中间产品的盛丝桶存放在中间库,供后加工使用.在后加工阶段,初生纤维经过牵伸、热定型、卷曲、切断,打包成成品.

涤纶短纤维生产过程是一个多阶段的生产过程,前一阶段生产后一阶段所需原料.产品转换时,纺丝需停车.当纤维的纤度变化达到一定值、生产异型丝和有色丝时,需要更换纺丝组件,而更换纺丝组件将增加转换费用.如果将具有相同或相近品种和规格的产品安排在一起生产,则不需要或只需要较少的调整时间,即更换较少的组件,就可以进行下一品种的生产,从而达到减少生产费用的目的,获得更大的生产效益.另一方面,过多纤度相同或相近的品种安排在一起生产,可能会导致某些产品不能及时交货.所以间接纺丝生产调度问题要解决的关键问题是二者的折衷,即: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,以保证计划期内总的效益最大.这是一类非常复杂的生产调度问题^[15,16].

2.2 数学模型

产品之间切换时分两种情况:

1) 需要更换纺丝组件进行生产切换.生产实践表明,生产不同产品规格的纤维时,纺丝组件过滤材料一定要选择合适的规格和配比,才能保证产品质量和可纺性,例如生产黑色丝时,选用合适规格的玻璃珠作组件过滤材料可延长组件使用周期.当纤维的纤度变化达到一定值,以及生产异型丝和生产有色丝时,需要更换纺丝组件.

2) 不需要更换纺丝组件.切换的时间还包括与生产顺序有关的准备时间,包括设备的清洗与更换时间,如必须清理反应器中的残留物,清洗或更换纺丝组件和过滤器等.

针对涤纶短纤维间接纺丝生产中影响调整时间和过渡费用的主要产品参数,制定出以下排产规则

以实现优化排产:1) 同品种产品尽量安排在一起生产;2) 纤度相同或相近的品种产品尽量安排在一起生产;3) 相同切断长度的产品尽量安排在一起生产;4) 有颜色的产品尽量安排在一起生产.

基本假设:1) 每种产品以相同顺序经过所有阶段(flow shop 工厂);2) 不考虑每种产品的中间产品库存费用;3) 最终产品库存依赖于存储量及单位库存费用;4) 每种产品的生产率一定,需求已知;5) 计划期为 3 个月,计划期末交货结算.

需要决定:1) 产品生产顺序;2) 每种产品开始生产时间和结束时间;3) 每种产品的库存水平.

目标函数:最大化效益,即

$$\text{Maxprofit} = \sum_i Pr_i W_{im} - \sum_i \sum_j Ctr_{ij} Z_{ij} - \sum_i C_i I_i - \sum_i r_{im} P_i W_{im}. \quad (1)$$

约束条件:顺序约束为

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

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

物料平衡约束为

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

$$W_{im} = r_{i,m+1} W_{i,m+1}, \quad \forall i, m = 1, 2. \quad (5)$$

过渡消耗约束为

$$Ct = \sum_i \sum_j Z_{ij} Ctr_{ij}. \quad (6)$$

时间约束,切换时间约束为

$$Ts_{im} = Ts_{i,m+1}, \quad \forall i, m = 1, 2; \quad (7)$$

$$Ts_{im} + T p_{im} = Ts_{i,m+1} + T p_{m+1}, \quad \forall i, m = 1, 2; \quad (8)$$

$$Tc = T p_{im} + \sum_i \sum_j ij m Z_{ij}, \quad \forall m. \quad (9)$$

需求约束,生产与需求平衡约束为

$$d_i T p_i = I_i, \quad \forall i; \quad (10)$$

$$I_i = 0. \quad (11)$$

式(1)是模型的目标函数,即最大化效益.其中,第1项是产品的生产(销售)收入;第2项为转换费用,转换发生时的转换费用用一个固定的费用项来表示;第3项为存储费用,为单位时间单位产品的平均存储费用;最后一项是原料采购成本.为了简化问题,暂不考虑生产过程中对各种产品生产费用和能源等的消耗,仅考虑加工任务的排序优化,即主要考虑车间调度优化问题.车间调度优化问题是指在满足以下约束条件的情况下,确定每道工序的加工设备和开工时间.除第一道工序外,其他工序的开工时间不能早于上道工序的完工时间.

约束(2)表示对任意产品 i , 有且仅有一个产品 j 在其之后生产; 约束(3)表示对任意产品 j , 有且仅有一个产品 i 在其之前生产; 约束(4)表示生产的产品量与生产时间成正比; 约束(5)表示在两个连续阶段产品 i 的物料平衡; 约束(6)表示调度中的转换消耗; 式(7), (8)和(9)的时间约束为: 加工任务第 1 道工序的开工时间不能早于任务的释放期, 最后一道工序的完工时间不能晚于任务的交货期; 约束(7)表示对任何一种产品, 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; 约束(8)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; 约束(9)表示生产周期是所有阶段(工序)中最长的处理时间; 约束(10)表示客户需求必须被满足, 约束(11)表示库存不为负。

符号说明如下:

- 1) $i, j = 1, 2, \dots, NP$ 为产品; $m = 1, 2$ 为阶段.
- 2) 连续变量: Tp_{im} 为产品 i 在阶段 m 的加工时间, Ts_{im} 为产品 i 在阶段 m 加工的开始时间.
- 3) 二值变量: 设 z_{ij} 为 0, 1, 如果产品 i 紧跟着产品 j 后生产, 则 $z_{ij} = 1$, 否则 $z_{ij} = 0$.
- 4) 参数: Tc 为生产周期, Ctr_{ij} 为产品 i 和产品 j 之间的切换消耗, d_i 为产品 i 的单位时间产量, Pr_i 为产品 i 的售价, t_{ijm} 为产品 i 在阶段 m 的切换时间, r_{im} 为产品 i 在阶段 m 的生产率, r_{im} 为产品 i 在阶段 m 的物料平衡系数, P_i 为原料的采购价, W_{im} 为产品 i 在阶段 m 生产的总量, C_i 为单位时间单位产品的平均存储费用.

3 涤纶短纤维生产 TS 与 VDS 混合算法

3.1 禁忌搜索

禁忌搜索是一种亚启发式搜索技术, 其特点是采用了禁忌技术. 禁忌搜索在搜索过程中允许接受劣解, 使得禁忌搜索算法具有强的“爬山”能力, 可以跳出局部最优解, 进而转向其他区域进行搜索, 从而大大增加了获得更好的解或全局最优解的概率. 但是禁忌搜索算法对初始解的依赖性较大, 良好的初始解可以使搜索获得满意解, 而较差的初始解则会降低收敛的速度, 且得到的解的质量也不高^[6,7].

3.2 TS 与 VDS 混合策略

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. 在 TS 算法中嵌入 VDS 主要是通过采用复合移动来实现邻域的变化. 复合移动由多个子移动组成, 子移动可以是一种移动方式, 也可以是两种移动方式穿插使用. 通常两种移动方式结合使用, 会搜索到

更广阔的空间^[9], 避免了单一移动的弱点, 加强了邻域搜索的能力, 因而能够得到更好的解^[10].

为了对当前解进行改进, 需要在当前解的邻域中搜索更好的解. 通过以下 3 种移动来构造 3 种不同的邻域^[11]: 交换移动、插入移动和块移动.

由于基本的插入移动和交换移动对解的改进能力有限, 复杂的解的结构变化不能通过基本移动得到^[12,13]. 为了实施多样化过程和提高算法的性能, 使用了块插入移动和块反转两种方法^[14]:

- 1) 块定义: 块是指产品序列中从某个产品开始的若干个连续的产品的有序集合, 其中要求块所包含的产品数大于 1.
- 2) 块插入移动: 将块看成一个产品整体移动到一个新的位置.
- 3) 块反转: 将块中产品序列按照原顺序的逆序排列得到一个新的块, 然后将得到的新块插入到原来块所在的位置. 这样一个过程称为块反转. 块移动、块反转的特点各不相同、目的各异.

3.3 TS/ VDS 混合算法

初始解构造是指从所有待选组件中, 挑取库存费用最小的产品成为最先生产的产品; 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下一次生产的产品, 直到挑完最后一个产品.

邻域构造是指结合问题的实际情况, 子移动采用了交换移动、插入移动和块移动相结合的方法. 本研究中将具有相同或相近性质的产品集中在一起得到一个块集合. 例如, 纤度相同或相近的产品 (3.33 dtex \times 38 mm, 2.78 dtex \times 51 mm, 3.33 dtex \times 64 mm, 3.33 dtex \times 97 mm), 有颜色的产品 (黑, 灰, 深蓝, 浅蓝) 等.

本算法搜索树深度分别为 3, 5 和 6; 直接取目标函数为适配值函数, 即效益总和; 选取固定长禁忌长度为 3, 5 和 7; 藐视准则: 若候选解优于最优解, 则忽视禁忌表属性, 而将其作为当前解, 并替代最优解; 终止准则: 若程序运行超过最大迭代步数 (99 次) 或者连续 16 次没有得到更好的改进解则终止.

4 计算结果

为了测试算法的有效性, 基于国内某大型石化企业的实际数据做了计算, 并将结果与传统 TS 算法结果进行了比较. 算法采用 Visual C++ 6.0 语言编程实现, 并在 3.0 G 主频的 Pentium (R) 4 系列 CPU 的个人计算机上运行, 结果见表 1.

本算法求解的是目标函数最大化效益问题. 表 1 中对 4 组不同数据进行了测试, 从结果可以看出, 对于同样的数据, TS 方法和 TS/ VDS 方法都能改进

表1 TS/ VDS结果与 TS结果的比较

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	3051.25	3178.16	4.16	3195.16	4.72
2	3177.24	3292.46	3.63	3375.81	6.25
3	2948.51	3069.21	4.09	3204.47	8.68
4	2864.31	2980.28	4.05	3089.69	7.87
平均			3.98		6.88

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.针对每组数据,TS/ VDS算法均能对初始解有较大的改进,最小的改进量为4.72%,最大的改进量为8.68%,平均改进量达到6.88%.

5 结 论

本文提出了禁忌搜索和变深度搜索混合策略,针对涤纶短纤维生产多阶段多品种连续生产的特点,运用了复合移动邻域的结构,从而使得算法具有较高的搜索效率.通过实际生产数据对算法性能进行了测试,实验结果表明了所提出模型和方法的有效性和实际应用价值.

参考文献(References)

- [1] Egli U M, Trippin D W. Short term scheduling for multi-product batch chemical plants [J]. Computers Chemical Engineering, 1986, 10(4): 303-305.
- [2] Pinto J M, Grossmann I E. Optimal cyclic scheduling of multistage multiproduct plants[J]. Computers Chemical Engineering, 1994, 18(9): 797-816.
- [3] Alle A, Pinto J M. Mixed-integer programming models for the scheduling and operational optimization of multiproduct continuous plants [J]. Industrial Engineering Chemical Research, 2002, 41(11): 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, 8(1/2): 3-15.
- [5] Zhang C Y, Li P G, Guan Z L. A tabu search algorithm with a new neighborhood structure for the job shop scheduling problem [J]. Computers and Operations Research, 2007, 34(11): 3229-3242.
- [6] Amin I E, Duffua S, Abbas M. A tabu search algorithm for maintenance scheduling of generating units [J]. Electric Power Systems Research, 2000, 54(2): 91-99.
- [7] Burak E, Sandra D E, Jain P. A tabu search algorithm for the flowshop scheduling problem with changing neighborhoods [J]. Computers and Industrial Engineering, 2008, 54(1): 1-11.
- [8] Peter G, Cár R. A simple filter-and-fan approach to the facility location problem [J]. Computers and Operations Research, 2006, 33(9): 2590-2601.
- [9] Pierre Hansen, Nenad Mladenović, Dragan Urošević. Variable neighborhood search and local branching [J]. Computers and Operations Research, 2006, 33(10): 3034-3045.
- [10] Michel G, François G, Potvin J Y, et al. Neighborhood search heuristics for a dynamic vehicle dispatching problem with pick-ups and deliveries [J]. Transportation Research, 2006, 14(3): 157-174.
- [11] Kengo K, Akihiro H, Hiroyuki N. An effective local search for the maximum clique problem [J]. Information Processing Letters, 2005, 95(5): 503-511.
- [12] Franca P M, Gendreau M, Laporte G. A tabu search heuristic for the multiprocessor scheduling problem with sequence dependent setup times [J]. Int J Production Economics, 1996, 43(2/3): 79-89.
- [13] Ravindra K, Ahuja E, James O B, et al. A survey of very large-scale neighborhood search techniques [J]. Discrete Applied Mathematics, 2002, 123(1-3): 75-102.
- [14] 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.
(Song G J. Modeling for scheduling problem of continuous galvanized coils and its system development [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.)
- [15] Yang G L, Michael F M. Flexible batch process planning [J]. Industrial Engineering Chemical Research, 2000, 39(6): 2045-2055.
- [16] Dobson G. The cyclic lot scheduling problem with sequence-dependent setups [J]. Operational Research Archive, 1992, 40(4): 736-749.