

基于水资源节约的印染企业订单排序优化模型及应用

孙 丽, 袁增伟, 姜伟立, 毕 军

(南京大学 环境学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210093)

摘 要 针对印染过程中的主要耗水环节——染布清洗, 运用过程优化思想, 构建基于水资源消耗量最优的染布订单排序模型, 并开发了基于动态生产的印染企业订单排序软件系统, 在此基础上以某印染企业为对象进行了应用研究. 结果表明: 运用该系统对印染企业订单进行优化排序以后, 在不对工艺和设备进行大量投资改造的情况下, 印染企业可以在现有基础上节水 20%–40%.

关键词 印染; 水资源节约; 过程优化; 订单排序

Order scheduling optimization for printing and dyeing enterprises aiming water conservation

SUN Li, YUAN Zeng-wei, JIANG Wei-li, BI Jun

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract Printing and dyeing industry consumes huge water resource. Consequently, it discharges a great deal of wastewater containing complex pollutants which cause a heavy pollution. It is difficult to treat the discharge and the treatment cost is very high. Heavy pollution has been a great barrier for the sustainable development of the industry. The study examines the approaches minimizing water resource of dyeing-cleaning process which is one of the most water consuming processes. The research provides an optimization model for the order scheduling which can decrease the water consumption. Furthermore, the study develops software for order scheduling. On the base of above, the software is applied to a dyeing and printing enterprise. The result shows that it can reduce 20–40 percent of water consumption without any further investment in technologies and equipments.

Keywords printing and dyeing industry; water conservation; process optimization; order scheduling

1 引言

印染行业是我国主要工业行业之一, 也是主要的水资源消耗和水污染物排放行业. 据统计, 印染行业每生产 1 kg 产品需要消耗 0.2–0.5 m³ 的水, 其废水排放量约占我国工业废水排放总量的 35%. 同时, 印染废水成分复杂, 末端处理难度大且处理成本很高^[1–2]. 因此, 研究印染行业节水减排技术对于实现印染行业可持续发展具有十分重要的意义. 然而, 目前印染行业还主要是通过废水处理实现达标排放, 其处理成本高且效果不明显, 虽然也有一些印染行业清洁生产技术方面的报道, 但基本上都集中在环保型染料和助剂开发, 节水设备和工艺改进等方面^[3–5].

印染过程中废水排放量最大的环节是染布清洗过程, 即更换染色品种时需要清洗机器, 清洗的废水中染料含量很高, 是主要的污染物之一. 染布清洗废水一般与染色工艺有关, 可改变性很小. 但通过有效的订单排

收稿日期: 2009-04-03

资助项目: 国家科技支撑计划 (2006BAC02A15); 国家自然科学基金 (40971302); 国家科技重大专项水体污染控制与治理课题 (2008ZX07103-007); 国家高技术研究发展计划 (2007AA06A404)

作者简介: 孙丽 (1986–), 女, 硕士研究生, 研究方向为生态设计; 袁增伟, 通讯作者, 副教授, 主要从事产业生态学研究, E-mail: yuanzw@nju.edu.cn.

序则可减少废水产生量, 即同一色系订单由浅到深安排生产, 只需要排空并清洗染缸, 不需要对整条生产线进行清洗, 从而每次减少机器清洗的废水. 因此, 如果能够在不影响交货的前提下, 将同色系的待染布料从浅到深安排在同一条生产线上生产, 或将不同时间接到的同色订单安排在一起生产, 就可以直接减少机器清洗次数及时间, 提高生产效率. 同时还可以减少机器清洗废水总量以及报废的剩余染料量, 减少后续污水处理负荷.

基于上述分析, 本文从过程优化的角度出发^[6-7], 针对印染企业过程优化中制约环境效益的一个主要因素——更换染色品种环节, 提出了基于水资源节约的印染企业生产订单排序模型, 在此基础上开发了基于动态优化算法的印染企业订单排序软件系统, 并在某印染企业进行了应用研究. 采用该方法可以在不对工艺和设备进行大量投资改造的情况下, 至少节水 20%–40%; 而且订单排序优化对大多数订单型印染企业具有普适性, 有利于推广和普及.

2 订单排序优化模型

2.1 问题描述及基本假设

考虑一个有多条并行长车生产线的订单型印染企业, 多个分属不同色系的订单在单条生产线上的染布清洗过程涉及如下模式 (如图 1):

- 1) 对于同种颜色的订单可以连续生产, 中间不需要对生产线进行清洗;
- 2) 对于不同颜色的订单生产又分两种情况:

A. 订单属于同种色系, 如果按照布料颜色由浅到深的顺序进行生产时, 中间只需要对生产线进行简单的清洗; 如果按照布料颜色由深到浅的顺序进行生产时, 中间需要对生产线进行全面清洗.

B. 属于不同色系的订单进行生产时, 中间需要对生产线进行全面清洗.

其订单生产的排序优化问题是一类重要的组合最优化问题, 它包括如下优化决策: 1) 将订单分配到生产线; 2) 将分配到同一生产线的订单排序.

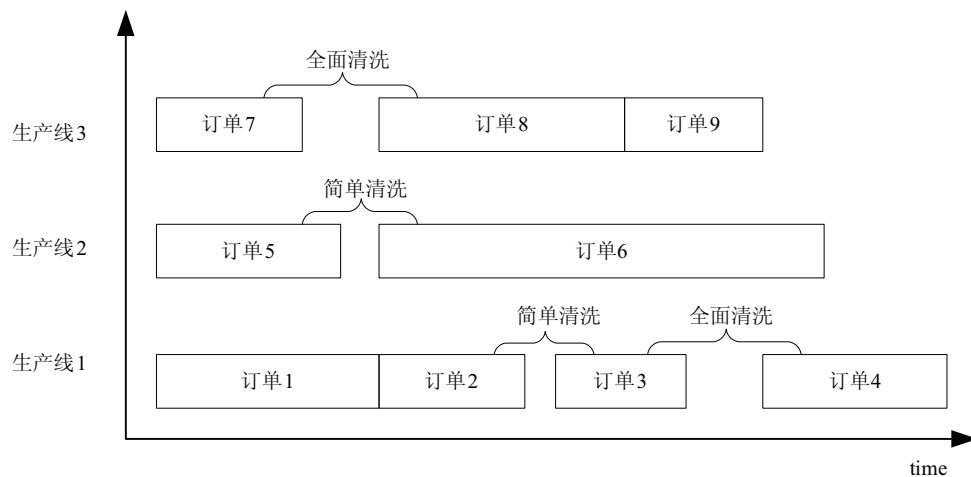


图 1 订单加工模式示意图

本文主要研究在满足订单的种类、相应数量和交货期的情况下, 以所有生产线上的清洗时间最短 (意味着清洗次数最少、水资源消耗量最少且废水产生量最少) 为目标, 对企业的订单生产进行整体优化. 为简化问题, 作如下假设:

- 1) 多个色系批量生产的印染企业的生产模式为订单驱动模式;
- 2) 模型参数全都能被确定;
- 3) 一个订单限定一个批量, 且不能被分解;
- 4) 一旦一个订单正在加工中, 它就不能中断和被重新安排;
- 5) 每个订单在任何一条生产线上均能生产;
- 6) 生产线不需要准备时间、处理时间;
- 7) 生产线生产不同颜色的布料时需要建立清洗时间;

8) 所有同种清洗过程 (简单清洗或全面清洗) 所需时间一样.

2.2 订单属性

订单的属性包括颜色属性和产品属性

$$O = (D, E),$$

式中 D 为订单的颜色属性, E 为订单的产品属性. 订单的颜色属性用以下两元组来定义:

$$D = (x, y),$$

式中 x 表示订单所属的色系, x 为 1-10 的整数; y 表示订单在所属色系中的深浅程度, 用 1-30 的整数表示; y 越小, 则说明其在该色系中的颜色越浅.

订单的产品属性 E 用以下四元组来定义:

$$E = (t, d, a, b),$$

式中 t, d, a, b 分别为订单的交货期, 订单长度, 订单的布料及厚度.

在订单的各个表征量中, 订单的布料 a 及厚度 b 共同决定该订单的染色速度 v .

2.3 订单排序优化模型

(一) 确定优化目标:

以所有生产线上的清洗时间最短为优化目标, 由于同类型清洗每次所用的时间相同, 因此清洗时间最优即清洗次数最少、水资源消耗量最少且废水产生量最少, 基于此目标, 构建优化目标函数:

$$\min \sum_{j \in J} S_{ij}, \quad \forall i \in I \quad (1)$$

式中: S_{ij} 是订单 i 在生产线 j 上建立的清洗时间, 它与前后生产的两种订单的颜色相关. J 是所有生产线的集合, I 是所有订单的集合.

(二) 约束条件

1) 生产线分配约束

对于每个分配给生产线的订单, 须满足:

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

式中: Y_{ij} 为一个二元变量 (取值为 0 或 1), $Y_{ij} = 1$ 表示订单 i 将被安排在生产线 j 上加工, 即在每个分配序列中, 每个订单有且只有一次分配到生产线上的机会^[8-9].

2) 订单交货时间约束

$$c_i \leq t_i \quad (3)$$

$$c_i \geq r_{ij} + S_{ij} + p_{ij} \quad (4)$$

$$S_{ij} = \begin{cases} \xi, & x_i \neq x_{i+1} \text{ 或 } x_i = x_{i+1}, y_i > y_{i+1} \\ \phi, & x_i = x_{i+1}, y_i < y_{i+1} \\ 0, & D_i = D_{i+1}, \text{ 即 } (x_i, y_i) = (x_{i+1}, y_{i+1}) \end{cases} \quad (5)$$

$$p_{ij} = \frac{d_i}{v_i} \quad (6)$$

c_i 是订单 i 完成时间; t_i 是订单 i 交货时间; r_{ij} 是生产线 j 被释放的时间, 即还需多长时间生产线 j 才能完成正在加工的订单; S_{ij} 是订单 i 在生产线 j 上建立的清洗时间, 它与前后连续生产的两种订单的颜色相关: 连续生产的清洗时间为 0, 简单清洗时间为 ϕ , 全面清洗时间为 ξ , 其中 ϕ, ξ 以各个企业实际清洗时间为准. p_{ij} 是订单 i 在加工单元 j 上的印染时间, v_i 为第 i 个订单在生产线上的染色速度, 以米/分钟 (m/min) 表示, 其由订单的 a_i (订单的质地) 以及 b_i (订单的厚度) 所决定.

式 (2)-(6) 规定了订单交货时间的约束.

3) 生产序列约束

对于安排在同一条生产线上印染的两个订单, 生产序列约束在时间上限定只有当前一个订单被完成, 后一个订单才能进行印染准备. 对于两个都安排给生产线 j 的订单 i 和 i' , 它们在重排生产序列时必须满足的约束为^[10]:

$$C_i + S_{i'j} \leq C_{i'} - p_{i'j} + M(1 - X_{ii'}) + M(2 - Y_{ij} - Y_{i'j}) \quad (7)$$

$$C_{i'} + S_{ij} \leq C_i - p_{ij} + MX_{ii'} + M(2 - Y_{ij} - Y_{i'j}), \quad \forall i, i' \in I \quad (8)$$

式中: $X_{ii'}$ 是一个二元变量, 表示当订单 i 和 i' 被安排在同一条生产线上印染时, i 是 (=1) 否 (=0) 比 i' 先印染. M 是一个足够大的正数.

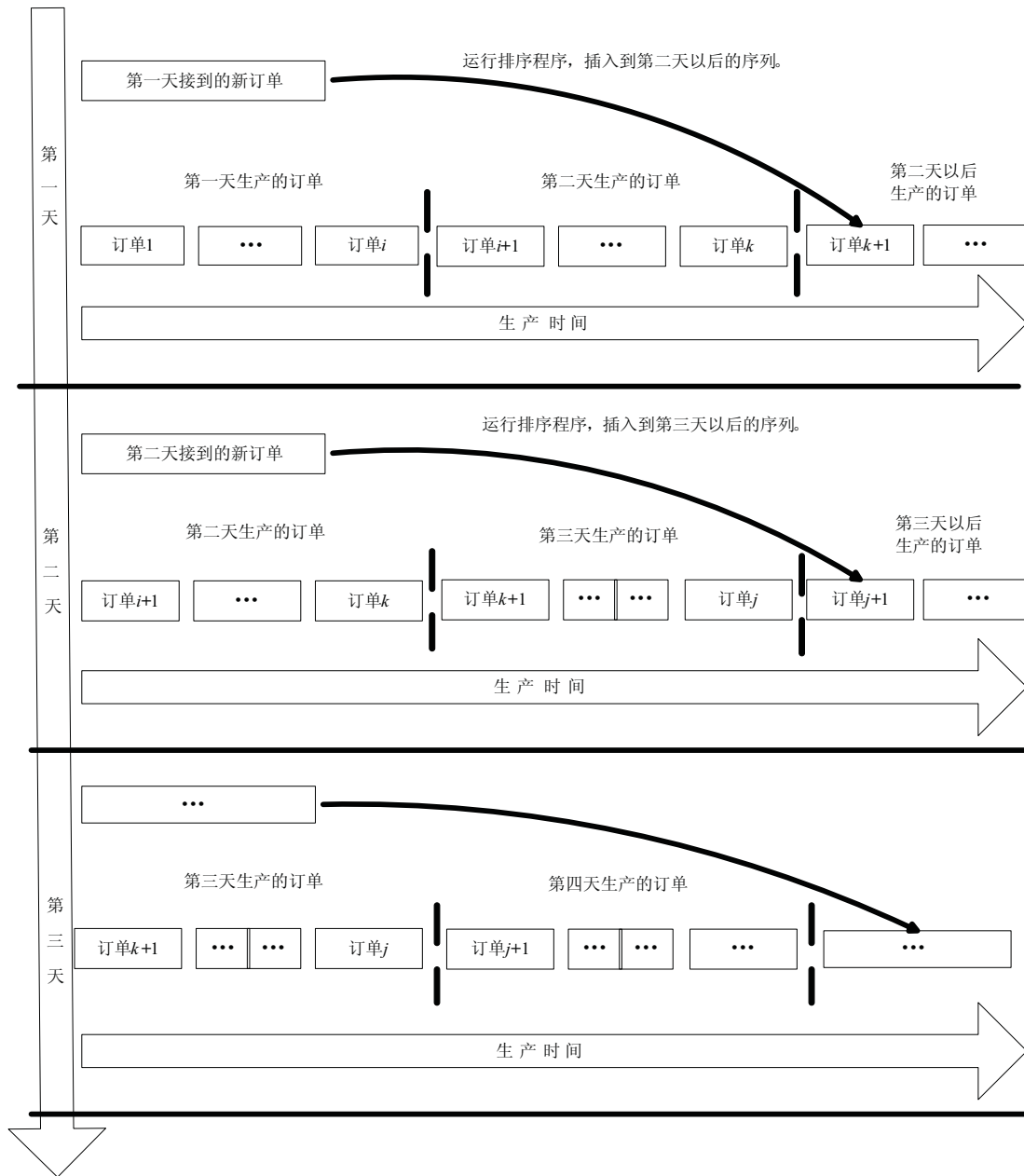


图 2 订单生产排序原则示意图

3 算法研究

3.1 动态生产订单排序算法

印染企业多数采用人工排序, 例如每周五统一安排下周一至周日的订单. 订单排序方案确定后, 为防止生产出现混乱, 即便在下周接到与本周内生产计划中同色的订单, 也不插入生产线. 另外, 在实际操作过程中, 经常会有一些突发情况, 如新的加急订单到达或老订单交货期改变、某批订单由于原材料的采购延迟等. 对于这些紧急订单, 企业来不及对原来的生产计划做出适当的调整, 或者重新制定生产计划, 只能对订单采取简单的插入生产或延后生产^[11]. 以上两种情况均增加了生产线不必要的清洗次数, 进而导致资源的浪费. 因此, 考虑印染企业的订单生产动态性对于订单排序优化算法的研究是一个关键的因素. 为了对企业订单排

序过程进行实时动态优化,在对订单进行排产时,采用如图 2 所示的原则:将第一天之前(包括第一天)接到的订单安排在第二天以后的生产计划,第二天需要用来为第三天的订单生产作原材料及生产的准备工作.这样既可以保证生产的稳定性,又可以将新接到的订单或者突发情况的订单及时安排,重新调整订单生产计划,从而减少清洗次数,节约资源和生产时间.

根据以上订单生产排序原则,设计如图 3 所示算法.

设计动态生产订单优化排序的程序运算步骤如下:

Step 1 判定步骤.判断是否使用新订单数据.如是,则输入订单属性数据,创建新文件,生产线的初始状态置为 0;如不是,则读取并修改已有的订单生产序列储存文件,序列前移一天,即去掉前一天已经完成的订单,订单交货时间减 24 小时,并且记录下每条生产线的初始状态.初始状态指生产线在前一天结束时印染的颜色,以便于今天排序时进一步减少清洗时间.

Step 2 判定步骤.使用旧数据后继续判断是否接到新订单,如是,则在已读取并且修改过的文件中添加新订单的属性数据;如不是则转至 Step 3.

Step 3 运行排序程序.关于此程序的算法步骤将在下面一节中详细叙述.

Step 4 停止运算,输出新的生产序列.

Step 5 程序运行结束.

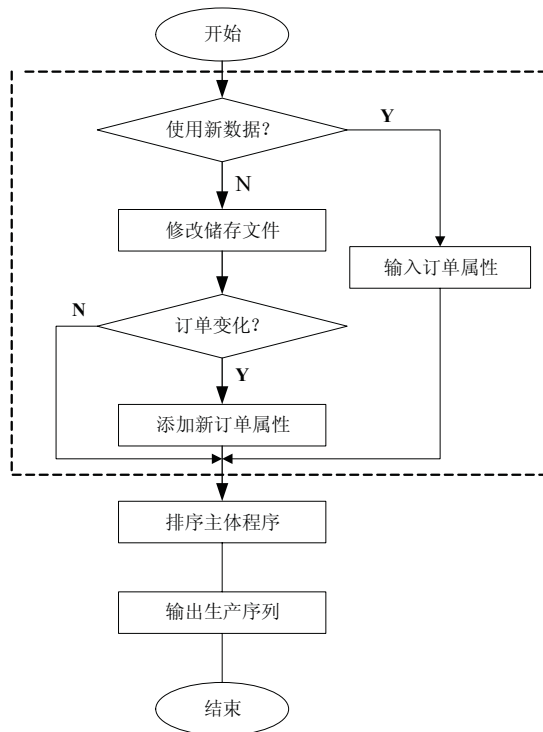


图 3 生产过程动态优化程序图

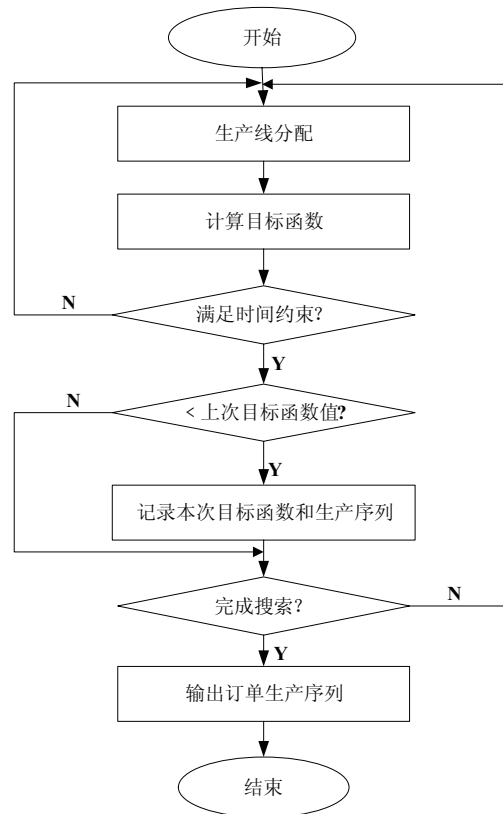


图 4 订单排序程序图

3.2 订单排序优化算法

订单排序优化研究的目的是实现所有生产线上总的清洗时间最短.在清洗时间最短的同时,就可以实现清洗次数最少、水资源消耗量最少,也即意味废水产生量最少.依据前面的订单排序优化的数学模型的基础,归纳算法步骤如下:

把所有的订单随机地分配到不同的生产线上,每一条生产线上所分配到的订单的顺序也是随机的,对出现的分配情况,检查每个订单是否满足交货时间约束.在满足交货的前提下,计算每条生产线在这种订单分配和排序下的清洗时间,并将所有生产线的清洗时间相加,得到一个总的清洗时间,即目标函数.搜索最小目标函数,此时所得到的分配方式和排序即满足了订单排序生产的最优化.

Step 1 把所有订单分配到各条生产线上,建立 2.3 节的生产线分配约束.

Step 2 计算清洗时间和结束时间.

Step 3 根据前面建立的数据模型, 应用分支定界法, 判定每条生产线上的订单是否满足订单交货时间约束和生产序列约束.

Step 4 判定本次决策是否比上次计算的生产线总清洗时间及完成时间和更少, 如是, 记录下本次清洗时间和排序序列; 如不是, 则不需记录.

Step 5 通过运算完成最优目标函数的搜索循环.

Step 6 完成搜索, 输出总清洗时间最小的生产序列: 包括订单在各条生产线上的分配情况以及在单条生产线的排序.

Step 7 程序结束.

本研究设计订单排序优化的步骤及程序如图 4 所示.

4 应用实例

本论文提出的模型及算法不仅能够实现对现有的订单进行排序优化, 而且对于刚接到的新订单也可以及时加入原生产计划中重新运行排序, 实现对订单排序的实时和动态优化. 而原来的人工排序对于这种特殊的突发订单(新加急订单到达或老订单交货期改变)只能采取简单的插入, 而不能对整体重新进行排产优化. 基于以上模型和算法为核心, 用 Excel 2007 为宿主的 VBA 进行软件编程. 利用该程序对实际调研的常熟市一家印染企业两个半月的 584 个订单在三条生产线上进行模拟仿真. 图 5 是该程序的运行界面截图.

| 满足交货期的 排序数量 | 第42个订单 完成时间 | 第43个订 单编号 | 第43个订单 完成日期 | 第43个订 单完成时间 | 第44个订 单编号 | 第44个订 单完成日期 | 第44个订 单完成时间 | 第45个订 单编号 | 第45个订 单完成日期 | 第45个订 单完成时间 | 第46个订 单编号 | 第46个订 单完成日期 | 第46个订 单完成时 |
|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|---------------|
| 499 | | | | | | | | | | | | | |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 49 | 39512 | 0.85417 | 46 | 39512 | 0.964167 | 1 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 49 | 39512 | 0.85417 | 46 | 39512 | 0.964167 | 1 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 46 | 39512 | 0.94417 | 49 | 39512 | 0.964167 | 1 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 46 | 39512 | 0.94417 | 49 | 39512 | 0.964167 | 1 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 46 | 39512 | 0.94417 | 1 | 39513 | 0.004167 | 49 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 46 | 39512 | 0.94417 | 1 | 39513 | 0.004167 | 49 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 49 | 39512 | 0.85417 | 46 | 39512 | 0.964167 | 1 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 46 | 39512 | 0.85417 | 46 | 39512 | 0.964167 | 1 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 46 | 39512 | 0.94417 | 49 | 39512 | 0.964167 | 1 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 46 | 39512 | 0.94417 | 1 | 39513 | 0.004167 | 49 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 46 | 39512 | 0.94417 | 1 | 39513 | 0.004167 | 49 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 49 | 39512 | 0.85417 | 1 | 39512 | 0.914167 | 46 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 49 | 39512 | 0.85417 | 1 | 39512 | 0.914167 | 46 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 1 | 39512 | 0.89417 | 49 | 39512 | 0.914167 | 46 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 1 | 39512 | 0.89417 | 46 | 39513 | 0.004167 | 49 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 1 | 39512 | 0.89417 | 46 | 39513 | 0.004167 | 49 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 49 | 39512 | 0.85417 | 1 | 39512 | 0.914167 | 46 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 49 | 39512 | 0.85417 | 1 | 39512 | 0.914167 | 46 | 39513 | 0.024 |
| | 0.6925 | 36 | 39512 | 0.813333 | 1 | 39512 | 0.89417 | 49 | 39512 | 0.914167 | 46 | 39513 | 0.024 |

图 5 订单排序优化程序运行图

将模型优化计算结果与原采用人工排序的计划进行对比, 可以看出, 如果将各订单在满足全部按期交货的前提下, 按照由浅到深的顺序进行排序生产, 减少换色时的清洗工作, 而其他都保持不变, 那么在对比的时间段内(两个半月), 工厂可以减少 185 次简单清洗. 该企业每次全面清洗生产线需要耗水 10 吨, 耗时 2h. 从而可以使企业至少减少新鲜水耗 1850 吨, 减少废水排放 1850 吨, 并节约 370 小时的生产时间. 在不对工艺和设备进行大量投资改造的情况下为企业带来了巨大的环境效益和经济效益, 取得了令人满意的应用效果.

5 结论

本文针对印染企业水资源消耗量和废水产生大的染色品种更换环节,开发了基于清洗时间最短的(也即清洗次数最少、水资源消耗最少和废水产生量最少)订单排序优化模型,该模型以最小化印染企业订单生产过程中的总清洗时间以及完成时间和为目标,将生产过程中的生产线分配、订单交货时间、生产序列为优化求解的约束,并研究了排序的优化算法,成功地实现了订单型印染企业的动态订单生产排序优化。实例分析结果证明了模型的有效性和实用性,通过对订单生产进行排序优化,既可以在生产过程中大大减轻人力资源(人力清洗印染生产线)和生产时间,又可以减少水资源的消耗和废水的排放量,进而减少了企业的治污费用,取得了显著的经济效益和环境效益,从而进一步提高印染企业的可持续发展能力。

参考文献

- [1] 李海红, 仝攀瑞, 郭雅妮. 关于印染工业污染防治的研究 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2005, 37(1): 141-143.
Li H H, Tong P R, Guo Y N. Study on preventing the pollution of print and dye trade[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Edition, 2005, 37(1): 141-143.
- [2] 杨蕴敏. 关于印染废水的回用问题 [J]. 上海纺织科技, 2007, 35(12): 3-4.
Yang Y M. Discussion on the reuse of dyeing and printing wastewater[J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2007, 35(12): 3-4.
- [3] 金晶, 汪永辉. 印染废水深度处理回用技术 [J]. 中国资源综合利用, 2005(8): 14-17.
Jin J, Wang Y H. The advance treatment and reuse of printing and dyeing waste water[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2005(8): 14-17.
- [4] 唐沁宇. 印染企业清洁生产实践 [J]. 印染, 2006(11): 27-32.
Tang Q Y. Clean production of dyeing and finishing[J]. Dyeing & Finishing, 2006(11): 27-32.
- [5] 金福江, 王慧, 李平. 过程控制清洁生产技术的进展 [J]. 化工进展, 2001(12): 23-25.
Jin F J, Wang H, Li P. Study and progress on cleaner production based on process control technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2001(12): 23-25.
- [6] 杨友麒, 庄芹仙. 节水减排的过程系统工程方法 [J]. 现代化工, 2008, 28(1): 8-13.
Yang Y Q, Zhuang Q X. Process system engineering methods for water conservation[J]. Modern Chemical Industry, 2008, 28(1): 8-13.
- [7] 曹永岩, 毛维杰, 孙优贤. 现代控制理论的工程应用 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001: 323-332.
Cao Y Y, Mao W J, Sun Y X. Engineering Application of Modern Control Theory[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2001: 323-332.
- [8] 蒋珉, 李敏. 多 Open-Shop 生产线协调生产计划的模型及仿真 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(11): 2421-2433.
Jiang M, Li M. Model and simulation of harmonious production planning for multiple Open-Shop product lines[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(11): 2421-2433.
- [9] Me'ndez C A, Henning G P, Cerda J. Optimal scheduling of batch plants satisfying multiple product orders with different due-dates[J]. Computers and Chemical Engineering, 2000, 24: 2223-2245.
- [10] 李浩, 沈祖志, 邓明荣. 订货型企业基于约束理论的订单排产优化研究 [J]. 中国机械工程, 2004, 15(10): 865-869.
Li H, Shen Z Z, Deng M R. Optimization research for order scheduling in make-to-order enterprises based on theory of constrains[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(10): 865-869.
- [11] 应保胜, 张华, 杨少华. 多品种批量生产企业的动态生产计划研究 [J]. 中国制造业信息化, 2003, 32(12): 85-88.
Ying B S, Zhang H, Yang S H. Dynamic scheduling model in multi-product batch manufacture[J]. MIE of China, 2003, 32(12): 85-88.