

考虑染色机清洗的印染生产过程优化调度

梅 红¹, 周晓慧^{2*}

(1. 杭州电子科技大学 理学院, 浙江杭州 310018;

2. 杭州电子科技大学 信息工程学院, 浙江杭州 310018)

摘 要: 目前印染车间作业计划还是依靠人工经验和软件辅助来安排, 而不是通过建立数学模型描述生产过程和求解获得的, 所以非常耗时, 作业计划的生产效率低, 甚至不能满足订单的交货期. 文中提出了包含染色机清洗的印染生产过程优化调度数学模型, 建立产品加工, 工序, 设备和交货期等的约束, 以最大程度满足订单交货期为目标函数. 不论订单有多少, 印染生产过程有几条生产线, 同一生产工序有几种生产设备, 该模型都能满足印染生产过程调度的要求, 只是数据文件的大小和模型求解的复杂度不同. 以印染企业的5个订单为案例, 通过ILOG CPLEX软件求解调度模型, 获得订单车间作业计划. 研究结果表明, 生产的安排满足了订单的交货期, 染色机只清洗了一次, 模型的求解时间为秒级, 极大地提高了印染车间作业计划安排的精确和效率.

关键词: 印染; 生产过程优化调度; ILOG; 染色机

中图分类号: TS941.19

文献标识码:A **文章编号:** 1000-4424(2024)02-0152-11

§1 引 言

生产过程优化调度问题^[1], 通俗地说, 就是根据生产工艺, 生产设备和物料库存等条件, 以满足订单交货期, 利润或生产效率等为目标, 安排一批订单进行生产. 由于不同行业生产过程的拓扑结构不一样, 有顺序, 有图形, 生产有连续, 有间隙, 还有连续和间隙混合的, 这些都是生产过程优化调度建模要考虑的基本问题.

国内外对化工, 冶金等行业的生产过程优化调度研究和应用都已经较成熟^[1-2], Mendez等人^[3]和Bouzary等人^[1], Pinto等人^[4], Shah^[5], Kallrath^[6], Floudas等人^[7], 就化工和冶金行业的优化调度的离散, 连续, 模型和求解进行了综述, 指出了各种方法的优缺点, 作者^[8]也就基于时间表达的化工过程调度方法发表了综述. 在具体的调度方法上, Kondili等人^[9], Shah等人^[10]和Gooding等人^[11]提出了离散时间模型表示方法, 他们把时间域分成了等长的时间片, 确

收稿日期: 2023-05-26 修回日期: 2023-11-13

*通讯作者, E-mail: zhouxh9971@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(11971139); 浙江省自然科学基金(LZ22F030005); 浙江省重点研发项目(2021C01144)

定是这些模型采用的比较粗糙的时间描述, 需要大量的二元变量和约束. 随后, 基于连续时间的模型得以开展研究, Pinto和Grossmann^[12]提出关于多工序批处理车间短期调度的连续时间的MILP模型, 他们将订单和设备单元在两个平行时间轴上进行分配, 并通过使用了一组含有四个参数(工序, 订单, 时间槽, 设备)的变量集合来进行匹配. Pinto和Grossmann^[13]又提出一种将预排序约束加入到设备时间槽中的改进模型. 通过使用订单的预排序, 原来模型中的四个参数的主变量可用含三个参数(订单, 工序, 设备)的变量代替, 因而减少了二元变量的数量和计算时间. 但他们的模型只适合预排序的订单, 仍不能处理顺序约束. Cerda等人^[14]提出对于一个单工序多产品可并行生产的批处理车间短期调度的MILP模型. 他们使用了一组含三个参数(前序订单, 后续订单, 设备)的变量集合来明确的处理订单顺序问题. Ierapetritou等人^[15]提出了一种新的对于批处理过程短期调度的连续时间模型, 他们使用了一种将订单和设备分离的新方法, 因而大大减少了决策变量的数量. 但他们的模型的应用仍受到预排序问题的限制. Hui等人^[16]对一个顺序依赖约束的多工序, 多产品批处理车间的短期调度提出了连续时间MILP一般模型. 此模型通过使用一组能描述订单排序和订单切换的含有三个参数(前序订单, 后序订单, 工序)的变量集合, 使得所需的二元决策变量数量明显减少, 并且此模型可以用于不考虑和考虑预排序约束两种情况.

中国是印染生产大国, 由于印染行业的生产特点, 国内外关于印染生产过程优化调度的研究极少, 国际上, Preecha Laoboonlur^[17]对用EDD(最早到期时间)分派规则和用经验来评估进行建模和求解进行了研究, 没考虑染色机清洗问题, 对于简单的调度问题, 已经证明了有较好的性能, 但效率一般. 分派规则的作用仍然局限于非常窄的一个调度问题范围.

在国内, 对印染生产过程优化调度的研究很少, 徐新黎等提出基于蚂蚁智能与强化学习相结合的协商策略的多Agent印染生产过程动态调度方法^[18], 并验证了有效性; 武治含对印染协同管理调度问题进行了研究^[19], 以各部门协同处理多个订单的作业时间最短为目标; 何宇翔等基于混合遗传算法对印染车间生产调度进行了研究^[20], 是 M 道工序加工 N 个零件的调度方法; 以上都非印染车间作业调度. 作者对单一工序, 多种设备并行的批处理印染生产过程的优化调度^[21]和无染色机清洗的印染车间作业计划优化调度^[22]进行了研究. 国内印染企业的车间生产调度还是软件辅助和人工经验安排, 如果订单多, 生产过程的约束多, 人工经验很难安排出优化的车间作业计划, 甚至连订单的交货期都无法满足.

本文针对印染生产工艺和染色机清洗的要求特点, 通过建立描述印染生产过程的优化调度数学模型, 把数学模型转化为程序设计语言模型, 以印染企业的实际订单数据为案例, 求解后获得高效合理的订单车间作业计划, 并进行案例分析.

§2 印染生产过程优化调度数学模型

2.1 印染生产工艺

印染生产是多品种和订单式驱动, 顺序生产过程, 工序多, 但不是每一产品的生产都要经过所有工序, 不同的产品可能经过不同的工序, 工序内是连续的, 有的几道工序连在一起也是连续的, 如柔软, 拉幅和预缩一起是连续的, 有的工序间是间隙的, 如丝光到染色. 因此印染生产过程调度是属于作业车间调度, 即Job Shop Scheduling^[2]问题范畴.

针对印染生产工艺特点和实际印染企业的经营管理方式, 有如下问题特征.

(1) 无材料等约束

在印染生产过程中, 原材料, 能源, 库存和人员都满足生产要求, 除了设备检修外, 生产过程中设备不出现意外的情况.

(2) 非抢占式生产

任何作业不能抢占已经在加工作业设备. 因为每一小车的布有几百或几千米, 以一小车为单位安排一定的车速进行加工, 不可能不加工完, 布是连续的.

(3) 设备车速与产品和工序相关

产品在某道工序的加工车速只与设备相关, 并且是固定的, 因此产品在每一工序的加工时间是可计算的.

(4) 设备准备时间和切换时间

染色机加工深浅对比度大的产品切换时间是不固定的, 但可以给出切换时间表, 工序间的坯布小车运输加上设备开工准备时间是固定的.

(5) 24小时生产

有的印染企业两班倒, 有的三班倒. 所以每天按24小时调度.

(6) 为了表述简单, 假设一个订单只有一个产品, 不影响模型.

(7) 染色机清洗

染色机染了深色的胚布, 接着要染浅色的胚布, 要清洗染色机.

2.2 调度数学模型

数学模型由约束和调度目标组成, 约束要求按一定的条件安排订单在每一道工序的加工, 而调度目标要求这种生产安排要最大程度地满足调度目标. 约束中包含了参数和需要求解的变量.

Chi-Wai Hui, Avaneesh Gupta^[16]针对化工生产过程的多产品, 多工序, 顺序加工的生产工艺特点, 对其生产过程优化调度进行了研究, Pinto J.M., Grossmann I.E.^[12]针对间歇和多工序的生产特点, 进行了基于连续时间的混合整数线性规划建模研究, 本文在这4位作者研究的模型基础上, 根据印染生产工艺特点和染色机清洗的要求, 给出了印染生产过程优化调度模型.

调度数学模型的参数定义如下.

(1) 与订单 i 有关的参数

i, i', j, j' : 订单号, 模型中将它们作为其它相关变量的一个索引参数; 为了方便使用订单号索引, 将其定义为 $1, 2, \dots, n$ 的有序自然数.

I : 订单任务 i 集合, 订单 i 属于其中.

I_u : 可以在生产设备 u 上进行加工的所有订单的集合.

(2) 与生产设备 u 相关的参数

u, u', v : 生产加工设备号, u 也作为其他相关变量的索引参数, 它们的取值范围为 $1, 2, \dots, n$ 的有序自然数.

U : 所有生产设备集合, 设备 u 属于其中.

U_l : 工作在工序 l 上的所有生产设备集合.

U_i : 能加工订单 i 的所有生产设备集合.

U_{il} : 在生产工序 l 上所有能加工订单 i 的生产设备集合.

CT_{iu} : 订单 i 在生产设备 u 上开始加工的准备时间, 此参数只取决于订单和生产设备本身, 例如工序间推小车的时间和设备准备时间.

C_{iju} : 订单*i*与订单*j*在加工设备*u*上切换所需要的时间, 它的值取决于*i*, *j*和*u*三个参数变量, 在模型中, 如染色机先加工深色产品后加工浅色产品的清洗时间.

(3) 与印染生产工序*l*相关的参数

l, l', m, m' : 表示印染生产工序, 取值范围为 $1, 2, \dots, n$ 的有序自然数, 在模型中作为其他变量的索引参数.

l_i : 一个订单任务*i*在印染生产过程中的最后一道工序, 该参量也可以作为其他变量的索引参数.

L : 印染生产中所有工序的集合.

L_i : 订单*i*在生产过程中需要经过的所有生产工序集合.

(4) 印染生产加工过程中的参数

D_i : 订单*i*的交货期.

T_{iu} : 订单*i*在印染生产设备*u*上的加工时间, 可以通过订单*i*的生产米数除以订单*i*在生产设备*u*上的加工速度获得.

H_{il} : 订单*i*在工序*l*上提前期的权值, 它的取值在模型约束中给出.

调度模型决策变量定义如下.

$Ts_{il} \in \mathbf{R}^+$: 订单*i*在工序*l*上的起始时间, 在时间轴的正轴上.

$Td_i \in \mathbf{R}^+$: 订单*i*在生产中的实际延期, 它的值定义为正数, 若订单*i*的完成时间提前于或者等于交货期, Td_i 都为零.

$W_{iu} \in \{0, 1\}$: 订单*i*是否安排在设备*u*生产, 它的解集指出订单*i*要在哪些设备*u*上进行加工.

$X_{ijl} \in \{0, 1\}$: 在生产工序*l*上订单*j*是否刚好是订单*i*直接后序生产订单. 值为1, 则表示生产工序*l*上, 订单*j*刚好是订单*i*直接后序订单.

$S_{iu} \in \{0, 1\}$: 订单*i*是否是设备*u*上加工的第一个订单, 值为1, 表示订单*i*是设备*u*上加工的第一个订单. 它的解集将确定所有生产设备的第一个加工的订单.

数学调度模型具体的约束条件描述如下.

(1) 生产设备上相邻加工订单的约束

$$W_{iu} + \sum_{v \in (U_j \cap U_l), v \neq u} W_{jv} + X_{ijl} \leq 2, \quad \forall i \in I, j \in I, i \neq j, u \in (U_i \cap U_j \cap U_l), \quad l \in L. \quad (1)$$

在工序间是连续的情况下, 确保工序*l*上相邻加工的订单必须分配在同一台生产设备上加工.

(2) 生产过程中工序, 订单关系

$$\sum_{j \neq i} X_{ijl} \leq 1, \quad \forall i \in I, l \in L, j \in I. \quad (2)$$

确保一个时间一个生产设备只能加工一个订单.

(3) 工序, 订单和订单前后加工关系中每一个订单至多有一个前序订单

$$\sum_{j \in I, j \neq i} X_{ijl} + \sum_{u \in (U_l \cap U_i)} S_{iu} = 1, \quad \forall i \in I, l \in L. \quad (3)$$

确保在一个工序一个加工订单只有一个前序加工订单.

(4) 决策变量 W_{iu} 和 S_{iu} 间的约束

$$W_{iu} \geq S_{iu}, \quad \forall i \in I, u \in U. \quad (4)$$

根据 W_{iu} 和 S_{iu} 的定义, 当订单 i 是第一个在设备 u 上加工或不在设备 u 上加工, 式(4)等号成立, 当订单 i 不是第一个在设备 u 上加工时, W_{iu} 等于1而 S_{iu} 等于0.

(5) 一台生产设备上至多加工一个订单

$$\sum_{i \in I} S_{iu} \leq 1, \quad \forall u \in U. \quad (5)$$

当订单都不分配给生产设备 u 进行加工, 设备 u 也就无被加工的订单, 即 $\sum_{i \in I} S_{iu} = 0$; 当 $\sum_{i \in I} S_{iu} = 1$, 订单 i 是唯一在设备 u 上第一个被加工的订单.

(6) 工序中订单和加工设备关系

$$\sum_{u \in (U_i \cap U_l)} W_{iu} = 1, \quad \forall i \in I, l \in L. \quad (6)$$

确保一个工序只有一台生产设备加工一个订单.

(7) 同一订单在连续工序中加工时间的约束

$$Ts_{im} - \{Ts_{il} + \sum_{u \in (U_i \cap U_l)} W_{iu} \times (T_{iu} + CT_{iu} + X_{ijl} \times C_{iju})\} \geq 0, \quad \forall l, m \in L_i, m > l, i, j \in I. \quad (7)$$

确保订单 i 在工序 l 的完成时间要早于订单 i 在后道工序 m 的开始加工时间. 订单 i 在工序 l 的加工时间包括了工序间推小车的时间, 设备准备时间和染色机清洗时间.

(8) 两个相邻订单在同一工序上加工时间约束

$$(1 - X_{ijl}) \times M + Ts_{jl} \geq Ts_{il} + \sum_{u \in (U_i \cap U_l)} W_{iu} \times (T_{iu} + CT_{iu} + X_{ijl} \times C_{iju}), \quad \forall i, j \in I, i \neq j, l \in L. \quad (8)$$

确保在同一道工序, 前一个订单加工完成后, 才能开始下一个订单的加工. 加工时间包括准备时间 CT_{iu} 和染色机清洗时间 C_{iju} .

(9) 订单加工完成时间和交货期关系

$$Td_i \geq \{Ts_{il} + \sum_{u \in (U_i \cap U_l)} W_{iu} \times (T_{iu} + CT_{iu} + X_{ijl} \times C_{iju})\} - D_i, \quad \forall i \in I, l_i \in L. \quad (9)$$

订单加工完成时间和订单交货期的差额用在目标函数上.

(10) 目标函数

印染企业的生产是订单驱动的, 特别是外贸订单要按时交货, 因此在保证能按时完成订单的前提下, 使得订单完成的提前期最小, 即让订单的完成时间最大限度的接近订单交货期. 目标函数表达为

$$\sum_i \sum_{l \in L_i} H_{il} \times \{Ts_{il} + \sum_{u \in (U_i \cap U_l)} W_{iu} \times (T_{iu} + CT_{iu} + X_{ijl} \times C_{iju})\} - \sum_i \sum_{l \in L_i} Td_i \times N, \quad \forall i \in I. \quad (10)$$

其中 L_i 是加工订单 i 要经过的工序.

调度的目标是使得目标函数取到最大值. 而 $\sum_i \sum_{l \in L_i} Td_i \times N$ 表示对所有未按时完工订单的惩罚, 促使订单的完成时间尽可能的接近交货期. 其中参数 H_{il} 由Pinto和Grossmann^[12]提出, 用来区分在最后工序中各订单执行的优先次序的,

$$H_{il} = 0.2 \times [\text{Max}(d)]/d_i \times \text{Ord}(l). \quad (11)$$

$\text{Max}(d)$ 是所有订单交货期的最大值, 而 $\text{Ord}(l)$ 指订单生产的工序序数.

§3 调度案例分析

ILOG CPLEX是世界领先的商用数学规划算法引擎,可以快速高效求解线性规划与混合整数线性规划的优化问题^[23]. 通过用ILOG CPLEX软件支持的建模语言OPL来表达调度数学模型,建立模型文件;利用ERP和MES数据库中的订单数据,工艺和设备信息等建立模型数据文件;用ILOG CPLEX求解调度结果;用甘特图的形式展示调度结果,即各订单在各工序使用什么设备,什么时间开始生产和结束.

3.1 订单和生产工艺

本案例要调度的共5个订单全部来自印染企业的真实数据,这些订单涉及9道工序,订单涉及的加工设备见表1,订单的加工工序见表2.

表1给出了这些订单要经过的工序和每一工序上加工设备的编号. 模型描述的是订单,工序,设备和订单交货期之间的约束关系,而海量的订单和工序等信息放在数据文件中,为便于计算,订单和工序等都用数字来表达. 在获得求解结果后,可将订单,工序和设备等数字编码转换成对应的订单,工序和设备名称. 表1中,每道工序的加工设备只有一台,因为印染的生产是流水线形式,一般大的企业有十多条流水线,本文的模型可以解决每道工序有多台设备参加加工的调度,只是模型的数据文件不同而已,但求解时问题的复杂度要增加.

表 1 订单涉及的工序和设备

工序号	工序名	包含的设备号
1	翻缝, 烧毛	1
2	退浆, 煮练, 氧漂	2
3	冷堆	3
4	退卷	4
5	丝光	5
6	预定型	6
7	染色	7
8	柔软, 拉幅	8
9	预缩	9

表2给出了5个订单的产品信息,包括订单名称,产品名称,产品颜色,产品生产数量,客户要求的交货期和产品所需加工的工序. 为了表述方便,交货期用小时来表达.

表 2 订单信息

订单	产品	颜色	量(米)	交货期(小时)	加工工序
I1	全棉弹力帆布	黑色	4000	19	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
I2	全棉府绸	石头色	7000	22	1, 2, 5, 7, 8, 9
I3	全棉贡缎	淡黄	5000	25	1, 2, 5, 7, 8, 9
I4	全棉斜纹	驼黄	6000	29	1, 2, 5, 7, 8, 9
I5	全棉双弹斜纹	橙色	8000	35	1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

表2中的全棉弹力帆布要经过8道工序,而全棉斜纹只经过6道工序,这是因为不同的产品对工艺有不同的要求,包括坯布质地和产品的颜色.

表3给出了5个订单经过每一工序时,该工序的加工速度,0表示该订单不经过该工序. 从而可以确定订单经过该工序加工的时间.

表 3 订单涉及工序的加工速度(米/小时)

工序号	订单1	订单2	订单3	订单4	订单5
1	6000	6000	5000	6000	6000
2	0	3000	2700	2700	0
3	2700	0	0	0	2700
4	3000	0	0	0	3000
5	4500	4200	4200	3300	3600
6	3000	0	0	0	2700
7	2400	2400	2400	2400	2400
8	3000	3600	3600	2400	1800
9	3600	3600	3600	3600	3600

3.2 调度结果分析

通过ILOG软件建立调度, 模型和数据文件, 求解后获得的决策变量 X_{ijl} , W_{iu} 和 S_{iu} 的值分别由图1, 图2和图3给出.

图1中横坐标代表的是印染车间的生产设备的编号, 而纵坐标表示订单编号, 此图给出决策变量 S_{iu} 的解集, 指出每一设备的起始加工订单, 如在设备号为4设备的第一个加工订单是1号订单.

图2中横坐标表示车间加工设备的编号, 而纵坐标表示订单编号, 此图给出了决策变量 W_{iu} 的解集, 指出订单在生产过程中的所分配的设备, 如1号订单在的整个生产过程经过的生产设备号是1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.

图3中的表格横坐标表示相应的5个订单, 纵坐标表示相应的9道工序, 变量OrderStartingTimeInAStage是二维数组, 表示每一订单在每一工序上的开工时间. 图3第一行第一列对应的数字指的是订单2在工序1上的开工时间为6.9173小时, 基准时间是零.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 1 决策变量 S_{iu} 的解

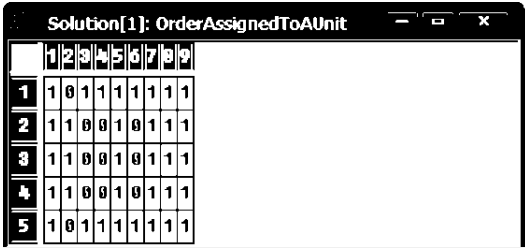


图 2 决策变量 W_{iu} 的解

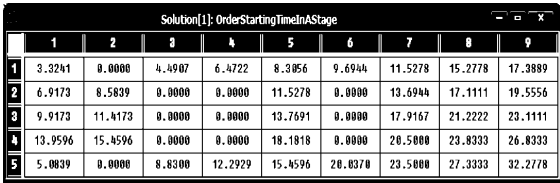


图 3 每个订单在每道工序上的开始加工时间

根据案例的求解结果, 画出如图4的甘特图, 图4中的U1表示设备1, I1表示订单1, 如订单1(I1)经过8道工序, 在每一道工序使用的设备分别是U1, U2, U3, U4, U5, U6, U7, U8, U9. 虚线和实线之间的时间间隔表示二道工序之间的推小车时间与设备准备时间之和.

工序7是染色工艺, 订单2在完成丝光工序后进行染色, 从图4看出, 在染色时要清洗机器. 这是因为根据表2订单信息, 订单1产品的颜色是黑色的, 而订单2产品的颜色是灰色的, 图4指出染色机U7是先加工订单1的, 然后再加工订单2, 黑比石头色要深的多, 所以要清洗.

从图4还可以看出, 调度结果染色机只清洗了一次. 这是因为订单1, 2, 3, 4和5产品的颜色分别是黑色, 石头色, 淡黄, 骆黄色和橙色, 后面四种颜色差别较小, 而从图4看出, 染色机加工的顺序是订单1, 2, 3, 4和5, 所以后面染色机就不要清洗.

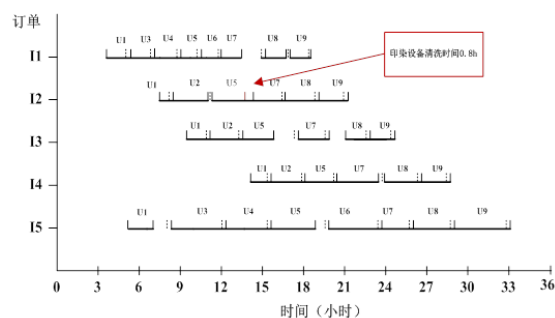


图 4 5个订单生产加工安排的甘特图

§4 结束语

本文针对印染生产工艺特点,给出了印染生产过程优化调度数学模型,用5个来自印染企业的实际订单和设备等信息建立数据文件,经CPLEX求解,获得5个订单车间作业计划,满足订单交货期,而且染色机只清洗了一次.文中给出了5个订单,一条生产线和单一设备,但不论印染生产过程有几条生产线,同一生产工序有几种生产设备,如多种类型的染色机,调度模型都能适应,不同的只是数据文件和求解复杂度大小.通过制造执行系统的可视化描述订单要经过的生产工序,生产工艺和设备要求时,数据文件可以自动获得.

这一研究结果可极大地提高印染车间作业计划安排的精确和效率,摆脱依靠人工经验安排的耗时和不合理导致的生产效率低.相对已发表的印染生产过程调度文章,本文在约束和变量上有明显的减少.模型求解是NP-hard问题,如果订单很多,生产工艺又不同;又有多条生产加工线,模型的求解要多少时间,在模型中增加启发式约束,以减少变量和约束,是要进一步研究的课题.还有现有订单正在生产,突然有紧急订单要插入生产,如何调整订单的车间作业计划和减少损失,也是要进一步研究的再调度问题.

参考文献:

- [1] Bouzary H, Chen F F. Resource scheduling in cloud-based manufacturing system: a comprehensive survey[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 122: 4201-4219.
- [2] Komaki G M, Sheikh Shaya, Malakooti Behnam. Flow shop scheduling problems with assembly operations: a review and new trends[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(10): 2926-2955.

- [3] Mendez C A, Cerda J, Grossmann I E. State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes[J]. Computers & Chemical Engineering, 2005, 30(6-7): 913-946.
- [4] Pinto J M, Grossmann I E. Assignments and sequencing models of the scheduling of process system[J]. Annals of Operations Research, 1998, 81: 433-466.
- [5] Shah N. Single-and multisite planning and scheduling: Current status and future challenges[C]. Proceedings of the Third International Conference on Foundations of Computer-Aided Process Operations. 1998, 75-90.
- [6] Kallrath J. Planning and scheduling in the process industry[J]. OR Spectrum, 2002, 24: 219-250.
- [7] Janak S L, Lin X, Floudas C A. Enhanced continuous-time unit-specific event-based formulation for short-term scheduling of multipurpose batch processes: Resource constraints and mixed storage policies[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2004, 43: 2516-2533.
- [8] Zhou Xiaohui, Chen chun. Review of optimization methods for scheduling of chemical processes based on the time representation[C]. Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. Chongqing, 2008: 9100-9104.
- [9] Kondili E, Pantelides C C, Sargent W H. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations-I MILP formulation[J]. Computers and Chemical Engineering, 1993, 2: 211-227.
- [10] Shah N, Pantelides C C, Sargent R W H. A general algorithm for short-term scheduling of batch operations. Part II. Computational issues[J]. Computers and Chemical Engineering, 1993, 17: 229-244.
- [11] Gooding W B, Pekney J F, McCroskey P S. Enumerative approaches to parallel flowshop scheduling via problem transformation[J]. Computers and Chemical Engineering, 1994, 18: 909-920.
- [12] Pinto J M, Grossmann I E. A continuous time mixed integer linear programming model for short-term scheduling of multistage batch plants[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1995, 34: 3037-3051.
- [13] Pinto J M, Grossmann I E. A alternate MILP model for short-term scheduling of batch plants with preordering constraints[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1996, 35: 338-342.
- [14] Cerdá J, Henning G P, Grossmann I E. A mixed-integer linear programming model for short-term scheduling of single-stage multiproduct batch plants with parallel lines[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1997, 36: 1695-1707.
- [15] Ierapetritou M G, Floudas C A. Effective continuous-time formulation for short-term scheduling. 1. Multipurpose batch processes[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 1998, 37: 4341-4359.
- [16] Hui Chi-Wai, Gupta A. A novel MILP formulation for short-term scheduling of multi-stage multi-product batch plants with sequence-dependent constraints[J]. Computers and Chemical Engineering, 2000, 24: 2705-2717.
- [17] Preecha Laoboonlur. Production scheduling in knitted fabric dyeing and finishing: A case approach[D]. Raleigh: North Carolina University, 2005.
- [18] 徐新黎, 郝平, 王万良. 多Agent动态调度方法在染色车间调度中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(3): 612-620.

- [19] 武治含. 基于遗传算法的印染协同管理调度问题研究[J]. 智能计算机与应用, 2019, 9(3): 142-145.
- [20] 何宇翔, 楚建安, 李珍, 等. 基于混合遗传算法在印染车间生产调度研究与应用[J]. 国外电子测量技术, 2022, 39(12): 141-146.
- [21] 梅红, 张智丰, 赖欢欢. 基于连续时间的生产过程优化调度[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(7): 1423-1427.
- [22] 周晓慧, 陈纯, 吴鹏. 印染车间作业计划优化调度[J]. 化工学报, 2010, 61(8): 1871-1881.
- [23] ILOG. ILOG OPL Studio 3.6.1 Language Manual[Z]. ILOG, 2020.

Optimized scheduling of printing & dyeing production process considering dyeing machine clean

MEI Hong¹, ZHOU Xiao-hui²

(1. College of Science, Hangzhou Dianzi Univ., Hangzhou 310018, China;

2. Information Engineering College, Hangzhou Dianzi Univ., Hangzhou 310018, China)

Abstract: At present, the workshop schedule of the printing and dyeing enterprises still relies on manual experience and software assistance to complete, rather than establishing mathematical models to describe the production process and solve it, which is very time-consuming. Also the production efficiency of the workshop schedule is low, and it cannot even meet the due date of orders. This paper proposes a mathematical model for optimizing the scheduling of printing and dyeing production processes, including dyeing machine cleaning. The model adopts continuous time modeling to establish constraints on product processing, processes, equipment, and delivery time, with the objective function of maximizing order delivery time. No matter how many orders there are, how many production lines there are in the printing and dyeing production process, and how many production equipment there are in the same production stage, this model can meet the requirements of printing and dyeing production process scheduling, but the size of the data file and the complexity of the model solution are different. In case study, taking 5 orders, equipment, and a production line of a printing and dyeing enterprise as a case, get orders, equipment, and process data from the information system of printing & dyeing enterprise to form a data file, describe the mathematical model using ILOG CPLEX OPL language, CPLEX is used to solve the OPL model obtain workshop schedule, The research results indicate that the workshop schedule meets the due dates of the 5 orders, and the dyeing machine was only cleaned once. The solving time of the model is in seconds, which greatly improves the accuracy and efficiency of the printing and dyeing workshop scheduling.

Keywords: printing & dyeing; optimized scheduling of production process; ILOG; dyeing machine

MR Subject Classification: 90B30