

文章编号: 1001-0920(2009)10-1455-08

冷轧合同批量调度的模糊 Job Shop 模型及算法

王志刚, 赵 璐, 王 伟

(大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 针对冷轧薄板生产线机组设备多、产品种类多的特点, 提出一种合同批量调度方法. 该方法将生产合同按产品种类和交货期组批处理, 建立了具有模糊处理时间的 Job shop 调度模型来描述整个生产物流情况, 并定义了分情况的合同批量加工时间推算规则. 针对调度模型的求解, 给出一种多子种群并行粒子群算法. 利用宝钢冷轧薄板厂的实际生产数据进行了试运行, 结果表明, 该方法可大幅度提高合同交货期满意度, 并能有效减少合同批量调度的工作时间.

关键词: 合同批量调度; Job Shop 问题; 模糊作业时间; 并行粒子群

中图分类号: TP399

文献标识码: A

Fuzzy Job Shop scheduling model and its algorithms for batch manufacturing on tandem cold rolling line

WANG Zhi-gang, ZHAO Jun, WANG Wei

(Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China.
Correspondent: ZHAO Jun, E-mail: jun.z@163.com)

Abstract: Considering the production characteristics of a long manufacturing process and a great number of product categories in cold rolling sheet line, this paper proposes a class of order batch scheduling method, which groups the available orders into a number of batches. A fuzzy Job Shop scheduling model is established to represent the whole logistics of a cold rolling plant in Shanghai Baosteel, in which an order batch is regarded as a fundamental scheduling job. Due to the inventory in front of each machine viewed as the buffer of production, a manufacturing time progress on each machine is defined according to the different scenarios. Then, a parallel particle swarm optimization based on multi-sub colony is proposed to solve the fuzzy scheduling model. The model and algorithms are attempted in the cold rolling plant, and the running results show that the order delivery satisfaction is greatly improved, and the scheduling working time is reduced.

Key words: Order batch scheduling; Job Shop problem; Fuzzy manufacturing time; Parallel particle swarm optimization

1 引 言

冷轧薄板生产线是钢铁工业中生产最终型产品的流程, 其产品属技术密集、资金密集型商品. 当前钢铁行业的管理者和技术人员已将发展生产计划与调度水平作为提高企业竞争力的重要手段, 以实现底层生产与上层购销过程的有机结合.

为解决冷轧生产线机组作业调度等问题, 研究人员针对流程中的罩式炉退火机组优化排产^[1,2], 冷轧机组的调度^[3,4]等问题进行了研究. 而上述研究以单个钢卷为基本调度单位, 仅实现了对单个机

组生产效率的改善和促进作用, 并未从全厂宏观计划的角度对物流情况进行整体配置. 在全厂物流配置方面, 文献[5]提出了冷轧薄板企业的多级计划与调度体系, 引入生产全过程闭环优化模型, 但文中并未给出各层次优化调度方案的细节; [6]提出将生产调度过程的参数, 如加工时间、交货期等, 采用模糊数来表示, 以反映生产过程的不确定性; [7]将模糊生产调度模型应用于冷轧薄板全产线, 但文中忽视了因各机组前库存在而造成的与经典模糊调度问题间的差异, 因而其实际应用仍存在难度.

收稿日期: 2009-01-20; 修回日期: 2009-05-15.

基金项目: 国家 863 计划项目(2007AA04Z156).

作者简介: 王志刚(1979—), 男, 河北保定人, 博士生, 从事流程工业生产计划与调度的研究; 王伟(1955—), 男(满族), 辽宁鞍山人, 教授, 博士生导师, 从事生产计划与调度、模型预测控制等研究

本文研究了钢铁流程行业目前普遍关心的多品种生产合同的组批调度,及其合同交货期全局优化问题.建立了具有模糊批量处理时间和模糊交货期的合同批量计划模型,将该模型归结为一类特殊的模糊 Job Shop 调度问题.考虑到冷轧实际生产过程因各机组前库存在的特殊性,给出了生产过程不同情况造成的各机组完工时间的差异,并对组批合同加工完成时间的计算方式进行了重新定义,最终获得各批量的机组加工次序.在模糊模型求解时,在调度方案的寻优过程中提出一种并行的粒子群优化算

法.最后,通过冷轧薄板厂的实际生产数据实例对模型与算法进行了验证,结果表明了该模糊组批调度方法的有效性.

2 冷轧产线组批调度模型

2.1 问题描述

冷轧薄板企业普遍具有复杂的生产流程,各工序之间有中间库起缓冲调节的作用.以宝钢冷轧薄板厂为例,图 1 给出了冷轧生产线物流情况及产出品概况图.

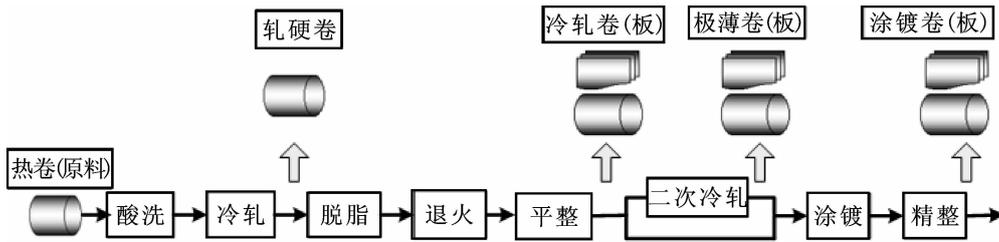


图 1 冷轧全厂物流概况及产品汇总

如图 1 所示,冷轧生产线的原材料为热轧钢卷.其产出品及对应的加工流程可归纳为以下 5 大类:

- 1) 轧硬卷:酸洗—冷轧;
- 2) 冷轧卷(板):酸洗—冷轧—脱脂—退火—平整;
- 3) 极薄卷(板):酸洗—冷轧—脱脂—退火—平整—二次冷轧;
- 4) 普通涂镀卷(板):酸洗—冷轧—脱脂—退火—平整—涂镀—精整;
- 5) 极薄涂镀卷(板):酸洗—冷轧—脱脂—退火—平整—二次冷轧—涂镀—精整.

鉴于冷轧薄板生产线制造工序多、产品种类多、约束条件繁杂等特点,目前其合同批量的计划与调度过程通常由调度人员依靠人工经验手工完成,而随着市场对钢铁产品时效性要求的不断提高,多品种小批量合同数量的增加,以及为满足用户需求,提高企业产品交货的准时度,进一步提高企业的竞争力,宝钢冷轧厂采取将客户合同按周交货的方式来组织生产.然而,依靠人工经验的调度方法很难满足这一生产需要,导致客户合同的交货满意度较差.就目前情况看,仅仅通过改良单个机组的作业效率,或仍沿用旧的人工计划方法,都很难满足市场对于冷轧薄板类产品数量及交货期的要求.

2.2 组批生产调度模型

本文将冷轧生产模式转化为满足离散调度问题的生产模式进行求解.由于在实际生产中,需以同类产品组批的方式完成制造任务,对于待调度的生产合同,按照其产品种类和交货期进行组批处理.将交

货周次划分为:周 I,周 II,周 III 等,即一个合同批次可表示为变量 B_{pw} . 其中: $p(p = 1, 2, \dots, 5)$ 为该批量合同的产品种类; $w(w = I, II, III, \dots)$ 为成品的交货周次.该合同组批方式为后续以实现精确的按周交货为目的的合同批量优化调度奠定了基础.

批量合同在机组上的加工时间用三角模糊数 $\tilde{A}_{ikjl}(a_{ikjl}^L, a_{ikjl}^M, a_{ikjl}^U)$ 表示,如图 2 所示.其中: $i = 1, 2, \dots, n$ 表示工件编号; $j = 1, 2, \dots, m$ 表示机器编号; k 表示工件在当前机器加工时所在整个流程中的次序,即工件 i 的第 k 步作业在机器 j 上进行; l 表示当前机器的加工任务序号,即机器 j 的第 l 个加工任务为当前任务;变量 $a_{ikjl}^L, a_{ikjl}^M, a_{ikjl}^U$ 分别表示该加工作业所需的最短处理时间,最可能处理时间和最长处理时间.定义批量合同的交货期为模糊数 $\tilde{D}_i(d_i^O, d_i^P)$,如图 3 所示.其中 i 表示合同批次; d_i^O, d_i^P 分别为批次的交货期乐观值和交货期悲观值.

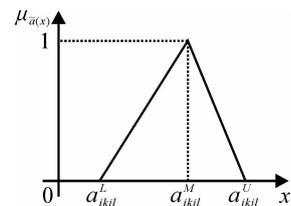


图 2 合同批量模糊加工时间隶属度函数

采用交货期平均满意度作为模型的优化指标^[6].给出模糊 Job Shop 组批调度模型如下:

$$\max J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\text{area } \tilde{F}_i) \cap (\text{area } \tilde{D}_i)}{\text{area } \tilde{F}_i} \quad (1)$$

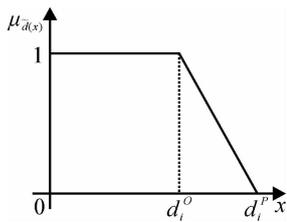


图 3 合同批量模糊交货期隶属度函数

s. t.

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{ikjl} &\geq 0, \\ l = 1 \text{ 且 } k = 1, \\ i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{ikjl} &\geq \tilde{F}_{j(l-1)}, \\ l \neq 1 \text{ 且 } k = 1, \\ i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{ij} &\geq \tilde{S}_{ij} + \tilde{A}_{ij}, \\ i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (4)$$

其中:area \tilde{F}_i 表示工件 i 的任务完工时间隶属度函数图形与横轴围成的面积;area \tilde{D}_i 表示工件 i 的交货期隶属度函数图形与横轴围成的面积; \tilde{S}_{ikjl} 表示工件 i 在机器 j 上加工的开始时间,以模糊数表示; $\tilde{F}_{i(k-1)}$ 表示工件 i 在其第 $k-1$ 步加工作业完工时间,以模糊数表示; $\tilde{F}_{j(l-1)}$ 表示机器 j 的第 $l-1$ 个生产任务的完工时间,以模糊数表示; \tilde{F}_{ij} 表示工件 i 在机器 j 上加工的完工时间,以模糊数表示; \tilde{F}_i 表示工件 i 的任务完工时间,以模糊数表示; \tilde{A}_{ij} 表示工件 i 在机器 j 上加工所需的时间,以模糊数表示。

模型中,式(1)为目标函数,即要找出组批序列的最优加工次序,使得所有组批的交货期满意度平均值 J 最大.交货期满意度为该批次的模糊完工时间隶属度函数和该批次模糊交货期隶属度函数相交所围成的面积与批次模糊完工时间隶属度函数的三角形面积之间的比,图 4 为批量交货期满意度计算的示意图.式(2)表示当加工作业为第 1 步,且为所在机器的第 1 个加工任务时,其最小开始时间为初始时间.式(3)表示当加工作业为工件的第 1 步时,其最小开始时间为机器 j 前一加工任务的完工时间,即在同一机器上前一个工件加工完成后才能加工后一个工件.式(4)表示工件在各台机器上的完工时间是在此机器上的开始加工时间与加工所需时间之和。

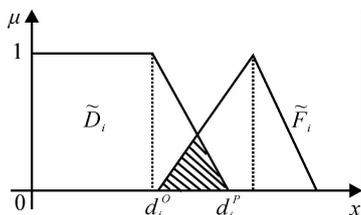


图 4 交货期满意度计算示意图

在文献[7]指出的模糊化 Job Shop 问题中,工件 i 在机器 j 上加工的最小开始时间规定为工件 i 前一步作业的完工时间与机器 j 前一加工任务完成时间相比的较大者,即

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{ikjl} &= \max\{\tilde{F}_{i(k-1)}, \tilde{F}_{j(l-1)}\}, \\ l \neq 1 \text{ 且 } k \neq 1, i = 1, 2, \dots, n, \\ j = 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (5)$$

然而对于冷轧实际生产情况而言,由于批量钢卷的连续生产过程中,在进入下一机组加工之前可先放入其前库缓冲存放,这与式(5)所表达的时间递推方式是不同的.另外,本文假设合同组批后的单个批次作为调度模型的基本单位.因此,合同批量 i 在机器 j 上加工的最小开始时间不能简单地通过工件 i 前一步工序的完工时间和机器 j 的前一加工任务完成时间(即 $\tilde{F}_{i(k-1)}$ 和 $\tilde{F}_{j(l-1)}$)之间的比较进行判断,而需对生产时间推算方法进行重新定义,即机组的开始加工时间还应当与工件 i 前一步工序的开始加工时间等变量有关.针对上述情况,本文定义的机组模糊完成时间推算方法将在后续部分介绍。

2.3 模糊运算法则

2.3.1 求和与取大运算

依照模糊数学的有关定义及其扩展原理^[8],给出加法运算和取极大运算,分别为

$$\tilde{u} + \tilde{v} = (u^L + v^L, u^M + v^M, u^U + v^U), \quad (6)$$

$$\tilde{u} \vee \tilde{v} = (u^L \vee v^L, u^M \vee v^M, u^U \vee v^U). \quad (7)$$

其中:算子[+]表示获得两值之和;算子[∨]表示取两值的较大者。

2.3.2 模糊数 rank 运算

在衡量工件的机组完成时间时,本文引入对三角模糊数的 rank 运算^[9],作为计算模糊处理时间的依据.给出以下 3 个 rank 计算标准:

标准 1 将 $R_1(\tilde{u}) = \frac{u^L + 2u^M + u^U}{4}$ 用于判断三角模糊数 rank 的第 1 标准。

标准 2 若标准 1 无法确定两个三角模糊数的大小,则采用 $R_2(\tilde{u}) = u^M$ 作为评价标准。

标准 3 若标准 1 和标准 2 均无法判断两三角模糊数的大小,则采用 $R_3(\tilde{u}) = u^U - u^L$ 进行评价。

由以上 3 个标准即可判断所有三角模糊数的 rank 问题.由此给出如下计算实例:

给出 4 个三角模糊数,分别为: $\tilde{u}_1 = (2, 4, 6)$, $\tilde{u}_2 = (1, 4, 7)$, $\tilde{u}_3 = (3, 6, 7)$, $\tilde{u}_4 = (2, 3, 8)$,通过以上 3 种判断标准依次判断.采用标准 1 可得: $R_1(\tilde{u}_1) = R_1(\tilde{u}_2) = R_1(\tilde{u}_4) = 4$, $R_1(\tilde{u}_3) = 5.5$,则 $\tilde{u}_{\max} = \tilde{u}_3$;再采用标准 2 可得: $R_2(\tilde{u}_1) = R_2(\tilde{u}_2) = 4$, $R_2(\tilde{u}_4) = 3$,则 $\tilde{u}_{\min} = \tilde{u}_4$;最后采用标准 3 可得: $R_3(\tilde{u}_1) = 4$,

$R_3(\tilde{u}_2) = 6$. 按照上述计算结果, 所给出的 4 个三角模糊数按照降序排列即为 $\text{Rank}(\tilde{u}_3) \geq \text{Rank}(\tilde{u}_2) \geq \text{Rank}(\tilde{u}_1) \geq \text{Rank}(\tilde{u}_4)$.

2.3.3 批量加工时间推算

本文对于合同批量加工隶属度函数的确定采用文献[7]给出的方式进行计算. 而对于某一完整调度方案下机组加工时间的递推规则, 由于冷轧全流程中每个机组都有前库用于存放待生产钢卷, 若完全按 Job Shop 模型, 即工件(批量合同)在某一机组上的开始加工时间以式(5)进行计算是不符合生产实际情况的. 在实际生产中, 某合同组批(工件) i 在机器 j 上的开始加工时间应是该合同组批中的钢卷已完成了机器 j 前道工序机组的生产, 并且机组 j 处于可用状态. 因此, 本文对变量 \tilde{S}_{ikl} 的确定方式给出如下 3 种情况分别处理:

1) $\text{Rank}(\tilde{F}_{j(l-1)}) \geq \text{Rank}(\tilde{F}_{i(k-1)})$, 即机组 j 的第 $l-1$ 个加工任务的完工时间晚于工件 i 的第 $k-1$ 步加工任务完成时间, 其三角模糊数表示如图 5(a) 所示.

2) $\text{Rank}(\tilde{S}_{i(k-1)}) \leq \text{Rank}(\tilde{F}_{j(l-1)}) \leq \text{Rank}(\tilde{F}_{i(k-1)})$, 即机组 j 的第 $l-1$ 个加工任务的完工时间晚于工件 i 第 $k-1$ 步加工任务的开始时间, 但早于其结束时间, 其三角模糊数如图 5(b) 所示.

3) $\text{Rank}(\tilde{F}_{j(l-1)}) \leq \text{Rank}(\tilde{S}_{i(k-1)})$, 即机组 j 的第 $l-1$ 个加工任务的完工时间早于工件 i 的第 $k-1$ 步加工任务的开始时间, 其三角模糊数如图 5(c) 所示.

根据以上所列的 3 种情况, 本文给出某合同组批(工件) i 在机组 j 上开始加工时间 \tilde{S}_{ikl} 的三角模糊数确定方法, 如以下规则集所述:

规则 1 若情况 1) 成立, 则表明机组 j 的前一加工任务完工时间晚于工件 i 前一步机组加工的结束时间, 即合同批次 i 中包含的部分钢卷在完成前一步机组加工任务后, 已有钢卷被放入机组 j 的前库等待加工. 因此, $\tilde{S}_{ikl} = \tilde{F}_{j(l-1)}$.

规则 2 若情况 2) 成立, 则表明机组 j 的前一加工任务完工时间介于工件 i 前一步机组加工任务的开始时间和结束时间之间. 该情况下即工件 i 的前一步加工任务完成之前已有部分钢卷进入机组 j 的前库等待加工. 因此, $\tilde{S}_{ikl} = \tilde{S}_{i(k-1)} \vee \tilde{F}_{j(l-1)}$.

规则 3 若情况 3) 成立, 即表明机组 j 的前一加工任务完成之后, 工件 i 的前一步机组加工任务才开始. 考虑到冷轧企业机组加工单个钢卷的速度相当快, 本文假设对单个钢卷的加工及设备装配时间均忽略不计. 则工件 i 在机组 j 上的开始加工时间 $\tilde{S}_{ikl} = \tilde{S}_{i(k-1)} \vee \tilde{F}_{j(l-1)}$.

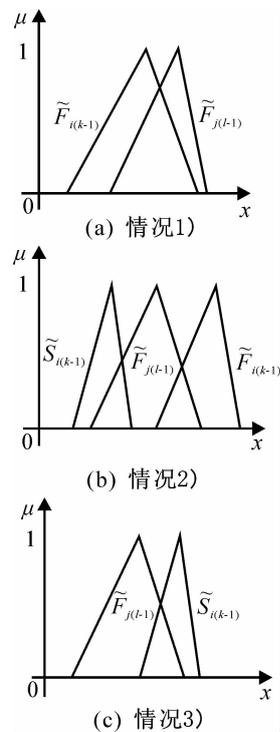


图 5 3 种不同生产情况下机组模糊完成时间之间的关系

3 合同批量调度问题求解

3.1 多种群异步并行 PSO 算法

在粒子群优化(PSO)算法中, 粒子位置的更新是在同一个迭代步骤中针对两个极点(全局最优和单个粒子最优)进行的, 表现为所有粒子以相同的整体认知水平完成搜索^[10]. 为提高粒子的小群体学习力度, 本文采用并行化的 PSO 算法对所提模型进行求解. 若将文献[10]给出的离散 PSO 算法进行简单的并行化处理, 则由于粒子在速度迭代计算上需要全局(或局部)最优位置, 种群之间的负载不均衡将会导致迭代相互等待的情况. 另外, 子种群数量也是需要考虑的关键因素, 一般而言, 并行粒度越细, 产生的进程数量越多使得进程间通信及进程管理所需的时间相对增多. 本文综合考虑以上两个并行算法的关键问题, 针对冷轧批量合同调度给出基于多子种群的异步并行 PSO 算法.

3.1.1 粒子初始化及子种群的划分

算法初始化采用随机方式产生 N 个粒子, 并随机赋予各粒子初始位置和速度. 假设对于 n 位整数编码的组合优化问题, 即随机产生 N 个 n 位不重复的整数串作为粒子位置量.

为保证子种群的多样性, 避免粒子位置过于集中或分散, 本文采用以下方式将全体粒子划分到 M 个子种群: 首先, 对 N 个粒子的随机位置求其适应度函数值, 按适应度大小由优到劣依次排列, 并对粒子从 $1 \sim N$ 进行编号; 然后, 将编号为 i 的粒子放入

第 $i(\text{mod})M + 1$ 个子种群中 ($i(\text{mod})M$ 表示 i 除以 M 所得的余数). 求解时, 算法将不同子种群的粒子运算运行于不同的进程上, 从而实现并行处理.

3.1.2 粒子位置和速度的更新

将全局粒子划分为子种群进行并行处理之后, 考虑到子种群内部粒子间的协作, 对 PSO 的基本原理进行了改进, 有

$$v_k^{t+1} = \omega \times v_k^t + c_1 r_1 \times (P_{kb} - P_k^t) + c_2 r_2 \times (P_{jb} - P_k^t) + c_3 r_3 (G_b - P_k^t), \quad (8)$$

其中参数 P_{jb} 表示粒子 k 所在子种群 j 内当前为止粒子所经过的最优位置. 这样, 粒子在新时刻的速度将以不同的程度跟随 3 种最优位置 (自身最优、子种群最优和全局最优) 进行调整.

3.1.3 参数选取和进程间信息交换

系数 c_1, c_2, c_3 描述了粒子趋向 3 个最优位置的加速权重, 本文根据经验设置加速系数均为 1.5. 惯性系数 ω 反映了粒子前时刻速度对新速度的影响程度, 较大的 ω 值有利于跳出局部极小点, 而较小的 ω 值有利于算法收敛, 对 ω 值进行线性动态调整, 即

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{S_{\max}} \times s. \quad (9)$$

其中: S_{\max} 表示子种群迭代次数, s 表示当前迭代次数, ω_{\max} 和 ω_{\min} 的值分别选取为 0.9 和 0.3.

在 PSO 算法的异步并行实现中, 粒子速度的更新需要对子种群当前最优位置和全局当前最优位置进行矫正, 因此, 本文对各子种群所在的进程设定了子种群最优和全局最优位置存储区. 在各进程异步迭代过程中, 子种群内部粒子一旦发现优于全局最优的新位置, 就以广播的形式发送给其余进程, 其他进程收到该可行解后, 立即将其存储到本进程存储区中, 作为当前全局最优值进行计算. 该方式不需要专门设定主进程来同步或搜集 (发送) 共享信息, 减少了进程间的通信, 而且更加符合粒子群计算的生物机理.

3.2 合同批量调度的求解步骤

根据所建立的模糊生产调度模型及改进的 PSO 算法, 下面给出冷轧生产线合同组批调度问题的求解步骤:

Step1: 对需编制组批生产计划的所有合同按交货期和产品种类进行组批.

Step2: 根据合同组批结果分别计算各批量钢卷在各机组加工的模糊处理时间, 确定批量作业时间的模糊隶属度函数, 并确定各批量的模糊交货期隶属度函数.

Step3: 初始化各机组状态, 随机产生一定数量

的初始粒子, 每个个体代表多批量的一种生产排序, 并按规则划分子种群.

Step4: 按模糊运算法则及所建立的模型计算各批量的模糊完工时间和组批交货期满意度, 并按式 (1) 求出个体的平均满意度目标函数, 得到当前全局最优解.

Step5: 运用改进的 PSO 算法进行寻优, 更新各子种群最优位置和全局最优位置.

Step6: 检验算法是否达到最终迭代次数, 若达到, 则输出全局最优批量生产次序作为模糊生产调度模型的最优调度方案; 否则, 重复 Step5.

4 数据实验

为验证所提出的模糊调度模型及算法的有效性, 在上海宝钢冷轧薄板厂进行了大量的现场数据实验. 结果表明, 本文方法得到的合同调度方案较现有的人工调度具有更高的交货期准确度. 人工调度的按周交货命中率一般在 70% 左右, 而本文方法按周交货命中率均在 90% 以上. 为说明该方法的优势, 选取冷轧薄板厂 4 周生产数据为例, 经合同组批形成批量 18 个, 如表 1 所示. 计算得出的各批量在机组上的模糊加工时间如表 2 所示, 其中括号中的 3 个数值分别是各批量对应机组加工的最短时间、最可能时间和最长时间.

模型求解过程中, 并行 PSO 算法的迭代次数设

表 1 合同组批数据统计表

组批号	产品种类	交货周次	合同数量	组批重量 / t
1	1	I	20	6710.0
2	1	II	26	8100.0
3	1	III	17	5400.0
4	1	IV	37	7950.0
5	2	I	65	3120.0
6	2	II	64	5570.0
7	2	III	72	4830.0
8	2	IV	77	5068.0
9	3	I	25	1910.0
10	3	II	16	2270.0
11	3	IV	12	960.0
12	4	I	35	2030.0
13	4	II	31	1740.0
14	4	III	22	2139.0
15	4	IV	70	1992.0
16	5	I	27	993.0
17	5	II	21	650.0
18	5	IV	12	398.0

表 2 各合同批量的机组模糊加工时间

批量号	酸洗	冷轧	脱脂	退火
1	(32.4,50.7,62.7)	(48.9,58.4,70.4)	---	---
2	(38.7,62.4,74.4)	(49.8,71.9,83.9)	---	---
3	(29.7,47.4,59.4)	(47.7,54.6,66.6)	---	---
4	(38.8,64.8,76.8)	(40.6,74.7,86.7)	---	---
5	(14.0,22.3,34.3)	(14.7,25.0,37.0)	(27.9,46.2,58.2)	(51.5,70.6,82.6)
6	(24.7,40.9,52.9)	(26.5,45.9,57.9)	(50.4,84.6,96.6)	(88.6,129.3,141.3)
7	(22.6,35.6,47.6)	(28.8,40.0,52.0)	(71.4,73.8,85.8)	(101.5,112.7,124.7)
8	(24.1,41.0,53.0)	(28.6,46.1,58.1)	(56.3,84.9,96.9)	(102.6,129.8,141.8)
9	(7.2,12.2,24.2)	(6.7,14.2,26.2)	(14.2,24.0,36.0)	(20.9,34.8,46.8)
10	(9.0,15.5,27.5)	(6.0,18.0,30.0)	(14.8,30.6,42.6)	(18.3,44.2,56.2)
11	(2.6,4.4,16.4)	(2.0,5.1,17.1)	(4.5,8.6,20.6)	(6.6,12.4,24.4)
12	(9.9,14.6,26.6)	(13.7,17.2,29.2)	(31.6,51.2,63.2)	(49.3,75.0,87.0)
13	(7.4,10.5,22.5)	(11.5,12.4,24.4)	(30.5,36.9,48.9)	(42.9,54.1,66.1)
14	(9.6,13.8,25.8)	(15.4,16.2,28.2)	(41.5,48.4,60.4)	(59.1,70.9,82.9)
15	(12.5,17.5,29.5)	(18.9,20.7,32.7)	(46.8,61.6,73.6)	(72.3,90.2,102.2)
16	(4.1,6.7,18.7)	(7.7,8.3,20.3)	(22.4,27.8,39.8)	(30.2,35.4,47.4)
17	(3.1,4.9,16.9)	(5.6,6.1,18.1)	(15.1,20.3,32.3)	(21.2,25.9,37.9)
18	(2.5,4.1,16.1)	(3.4,5.2,17.1)	(6.5,16.9,28.9)	(12.3,21.5,33.5)

批量号	平整	二次冷轧	涂镀	精整
1	---	---	---	---
2	---	---	---	---
3	---	---	---	---
4	---	---	---	---
5	(30.0,54.5,66.5)	---	---	---
6	(59.1,99.9,111.9)	---	---	---
7	(77.4,87.1,99.1)	---	---	---
8	(68.9,100.3,112.3)	---	---	---
9	(9.9,22.6,34.6)	(13.1,24.2,36.2)	---	---
10	(16.2,28.7,40.7)	(20.5,30.7,42.7)	---	---
11	(5.4,8.0,20.0)	(6.5,8.6,20.6)	---	---
12	(36.9,58.9,70.9)	---	(89.7,128.9,140.9)	(82.2,115.7,127.7)
13	(34.2,42.5,54.5)	---	(78.0,92.9,104.9)	(71.5,83.4,95.4)
14	(52.9,55.7,67.7)	---	(107.5,121.8,133.8)	(98.6,109.3,121.3)
15	(59.7,70.9,82.9)	---	(131.4,155.0,167.0)	(120.5,139.2,151.2)
16	(28.6,32.0,44.0)	(31.7,38.4,50.4)	(54.8,64.8,76.8)	(50.3,56.7,68.7)
17	(19.2,23.4,35.4)	(24.1,28.1,40.1)	(38.6,47.4,59.4)	(35.4,41.4,53.4)
18	(8.6,19.5,31.5)	(8.9,23.4,35.4)	(22.3,39.4,51.4)	(20.4,34.4,46.4)

置为 200 次,粒子总数为 150,子种群个数设为 3,其他参数如前文所述,经优化得到的合同批量的加工次序及各阶段的机组模糊完工时间如表 3 所示.其中:各机组的批量加工次序为相应机组所在的列依次排列,单元格中的数值为所加工的批量编号及其完成时间的三角模糊数.为进一步说明所提算法的

优势,将该并行 PSO 算法与文献[7]提出的基于邻域搜索的单亲遗传算法进行比较.在优化结果方面,在月合同批量的调度数据规模下,采用本文和文献[7]给出的算法可得到基本相同的平均交货期满意度,其值均在 93.5% 以上,均明显优于手工调度方法;而在获得调度方案所需时间方面,一般具有丰富

表 3 经优化后的各批量加工次序及机组完成时间

h

次序	酸 洗	冷 轧	脱 脂	退 火
1	11(2.6,4.4,16.4)	11(4.6,9.5,33.5)	11(9.1,18.1,54.1)	11(15.7,30.5,78.5)
2	5(16.6,26.7,50.7)	5(19.3,34.5,70.5)	5(37.0,64.3,112.3)	5(51.1,93.0,165.0)
3	16(20.7,33.4,69.4)	16(27.0,42.8,90.8)	16(59.4,92.1,151.2)	16(95.8,133.1,208.5)
4	9(27.9,45.6,93.6)	9(33.7,57.0,117.0)	9(73.6,116.1,188.1)	9(107.3,159.1,243.6)
5	17(31.0,50.5,110.5)	17(39.3,63.1,135.1)	18(88.7,136.4,220.4)	17(137.5,194.7,290.7)
6	13(38.4,61.0,133.0)	13(50.8,75.5,159.5)	13(119.2,173.3,269.2)	13(173.7,239.7,347.7)
7	1(70.8,111.7,195.7)	1(99.7,133.9,229.9)	18(125.7,190.2,298.2)	18(191.0,270.8,390.8)
8	18(73.3,115.8,211.8)	18(103.1,139.1,247.0)	10(140.5,220.8,340.8)	10(210.9,301.5,433.5)
9	10(82.3,131.3,239.3)	10(109.1,157.1,277.0)	14(198.3,269.2,404.0)	14(265.9,372.7,516.7)
10	3(112.0,178.7,298.7)	3(156.8,211.7,343.6)	7(293.4,373.6,541.5)	7(349.5,475.0,631.0)
11	14(121.6,192.5,324.5)	14(172.2,227.9,371.8)	15(340.2,435.2,615.1)	15(433.3,571.5,739.5)
12	2(160.3,254.9,398.9)	2(222.0,299.8,455.7)	8(396.5,520.1,712.0)	8(514.8,691.1,871.1)
13	7(182.9,290.5,446.5)	7(250.8,339.8,507.7)	12(428.1,571.3,775.2)	12(585.4,779.5,971.5)
14	15(195.4,308.0,476.0)	15(269.7,360.5,549.4)	6(478.5,655.9,871.8)	6(656.9,895.5,1099.5)
15	8(219.5,349.0,529.0)	8(298.3,406.6,598.5)		
16	4(258.3,413.8,605.8)	4(338.9,481.3,685.2)		
17	12(268.2,428.4,632.4)	12(352.6,498.5,714.4)		
18	6(292.9,469.3,685.3)	6(379.1,544.4,772.3)		
次序	平 整	二次冷轧	涂 镀	精 整
1	11(21.1,38.5,98.5)	11(27.6,47.1,119.1)	16(117.5,157.8,233.7)	16(122.0,165.9,241.8)
2	5(67.2,101.1,161.1)	16(98.9,139.5,215.4)	17(157.4,212.7,308.7)	17(160.6,218.7,314.7)
3	16(97.4,136.5,209.0)	9(112.0,163.7,255.6)	13(232.1,302.1,410.1)	13(238.6,311.6,419.6)
4	9(118.3,171.3,255.3)	17(142.4,199.4,295.4)	18(259.0,346.0,466.0)	18(260.9,351.0,471.0)
5	17(139.5,197.2,293.2)	18(195.3,274.7,394.7)	14(359.5,460.3,592.3)	14(369.4,472.8,604.8)
6	13(182.4,251.3,359.3)	10(215.2,305.4,437.4)	15(494.1,639.8,807.8)	15(505.0,655.6,823.6)
7	18(194.7,272.8,392.8)		12(630.7,836.3,1028.3)	12(638.2,849.5,1041.5)
8	10(213.0,317.0,449.0)			
9	14(272.1,387.9,531.9)			
10	7(373.6,500.6,656.6)			
11	15(445.9,590.8,758.8)			
12	8(548.5,720.6,900.6)			
13	12(597.8,795.6,987.6)			
14	6(686.4,924.9,1128.9)			
15				
16				
17				
18				

调度经验的人员,在进行一个月产量的合同批量调度所需的时间一般为 2h 左右,本文及文献[7]的两种算法均在几分钟之内即可获得最优调度方案.在相同的硬件配置(CPU 3.0GHz,内存 2G)下,本文给出的算法也采用 C++ 编程.对两种算法进行详细比较可知,对于相同的月生产合同数据,经过多次

计算统计,文献[7]算法的求解时间平均为 98s,而本文算法计算相同规模的调度方案所需时间平均为 71s.分析其原因可能是由于该异步并行 PSO 算法中增加了对子种群最优解的迭代学习机制,提高了算法的收敛能力,从而使其在较短的时间内获得模型的最优解.另外,更重要的是文献[7]忽视了因各

机组前库存在而造成的与经典模糊调度问题间的差异,因而难以实际应用.而本文算法给出的合同批量加工次序及各阶段机组模糊完工时间(如表 3 所示)更符合实际生产情况,该结果已得到冷轧厂具有丰富生产经验的调度人员的肯定.以上两方面综合结果表明了采用本文模型与算法对求解冷轧合同批量调度问题的有效性.

5 结 论

考虑到冷轧薄板生产过程中作业时间的不确定性,本文针对其合同组批调度问题建立了基于规则的模糊化作业时间 Job Shop 调度模型,并采用一种多子种群并行 PSO 算法进行求解.上海宝钢冷轧薄板厂的实际生产数据试运行结果表明,该调度方法较目前的手工调度方法可大大提高生产合同的交货期满意度,从而满足客户订单的市场需求.此外,采用本文提出的调度方法,一般在 2 min 之内即可获得月合同批量计划,从而大幅度提高了合同批量调度任务的工作效率.

参考文献(References)

- [1] Moon S, Hrymak A N. Scheduling of the batch annealing process-deterministic case[J]. Computers and Chemical Engineering, 1999, 23(9): 1193-1208.
- [2] Liu Q, Wang W, Zhan H, et al. Optimal scheduling method for a bell-type batch annealing shop and its application[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(10): 1315-1325.
- [3] Wang D, Tieu A K, Boer F G, et al. Toward a heuristic optimum design of rolling schedules for tandem cold rolling mills [J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, 2002, 13(4): 397-406.
- [4] Zhao J, Liu Q, Wang W. Models and algorithms of production scheduling in tandem cold rolling[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(5): 565-573.
- [5] 史海波, 马玉林, 刘爱国. 冶金冷轧薄板企业生产计划调度体系结构及方法研究[J]. 信息与控制, 2004, 33(1): 31-35.
(Shi H B, Ma Y L, Liu A G. Research on the structure and method of production planning and scheduling for cold-rolled sheets plant[J]. Information and Control, 2004, 33(1): 31-35.)
- [6] Masatoshi S, Testuya M. An efficient genetic algorithm for job-shop scheduling problems with fuzzy processing time and fuzzy due date[J]. Computers and Industrial Engineering, 1999, 36(2): 325-341.
- [7] 赵珺, 王伟, 刘全利. 冷轧薄板生产线组批调度模型与算法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(10): 1957-1965.
(Zhao J, Wang W, Liu Q L. Model and algorithm of grouping batch scheduling for cold rolling sheet production line[J]. Computer Integration Manufacturing System, 2008, 14(10): 1957-1965.)
- [8] Sakawa M. Fuzzy sets and interactive multi-objective optimization[M]. New York: Plenum Press, 1993.
- [9] Kaufmann A, Gupta M. Fuzzy mathematical models in engineering and management science[M]. Amsterdam: North-Holland, 1988.
- [10] Wang K P, Huang L, Zhou C G, et al. Particle swarm optimization for traveling salesman problem[C]. Proc of 2nd Int Conf on Machine Learning and Cybernetics. Xi'an, 2003, 11: 1583-1585.
- [7] Ulrich Berger. Best response dynamics for role games [J]. Int J Game Theory, 2001, 30: 527-538.
- [8] 陈亚林, 王先甲, 朱文琦. 基于两阶段博弈的企业竞争行为选择及仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(5): 1353-1356.
(Chen Y L, Wang X J, Zhu W Q. Choosing and simulating strategic action of enterprise based on dual stage game based on dual stage game[J]. J of System Simulation, 2006, 18(5): 1353-1356.)
- [9] 余冬平, 邱苑华. 基于期权博弈的新产品项目战略投资决策[J]. 控制与决策, 2007, 22(6): 613-617.
(Yu D P, Qiu W H. Strategic investment of new product projects based on option games[J]. Control and Decision, 2007, 22(6): 613-617.)
- [10] Liu Jian-mei, Ma Shou-feng. Algorithms of game models on individual travel behavior[C]. The 8th Int IEEE Conf of Chinese Logistics and Trans Professionals. Chengdu, 2008: 3060-3066.
- [11] 宋梅萍, 顾国昌, 张国印. 随机博弈框架下的多 agent 强化学习方法综述[J]. 控制与决策, 2005, 20(10): 1081-1090.
(Song M P, Gu G C, Zhang G Y. Survey of multi-agent reinforcement learning in Markov games [J]. Control and Decision, 2005, 20(10): 1081-1090.)

(上接第 1454 页)