基于部分生产重构的冷轧生产重调度方法

王 利 [1] 赵 珺 [1] 王 伟 [1]

摘 要 针对冷轧薄板生产过程单纯根据合同流向组织生产会造成合同在各物流流向中分配不均, 以及机组定修和突发故障等情况造成的部分流向生产停滞等问题, 建立了基于部分重构的冷轧生产过程混杂 Petri 网生产调度模型. 利用提出的有限搜索蚁群算法, 在不同生产流向的可替代机组之间, 根据机组的产能负荷对合同的生产流向进行部分重构, 实现合同生产过程的再规划与动态调度, 解决了部分机组停机定修和突发故障时的产能分配问题. 将本文提出的方法与全流程合同计划方法相结合, 利用上海宝钢冷轧薄板厂的生产数据进行测试, 表明了所提出的方法提高了冷轧全流程合同计划与调度效果的可行性.

关键词 冷轧, 生产过程重构, 混杂 Petri 网, 蚁群算法

DOI 10.3724/SP.J.1004.2011.00099

Rescheduling Method in Production Process of Cold Rolling Based on the Partial Reconfigurable Production

WANG Li [1] ZHAO Jun[1] WANG Wei[1]

Abstract The arrangement of production only by means of order flows may often cause the uneven productivity flows. The regular maintenance and some unanticipated faults that are inevitable may make a certain production flow be shutdown. For solving such a problem, a model of partly reconfigurable hybrid Petri net is established and a finite-searching ant colony optimization is presented in this paper according to the hybrid characteristics of cold rolling plant. With reconfiguring the production flows of orders among the fungible machines, the above method gives a redesign of production flow and the dynamic scheduling solution of orders production in order to resolve the production scheduling due to the maintenance and faults. The practical experiments with real data of Shanghai Baosteel Co., Ltd. illustrate that the proposed method obtains a great improvement of the production planning and scheduling of whole production flow.

Key words Cold rolling, process reconfigurable, hybrid Petri net, ant colony optimization

钢铁冷轧生产过程的资源和能源消耗大, 产品品种多, 产品附加值高, 利润高, 用户要求高. 制定可行的冷轧生产计划与动态调度方案, 合理分配企业内部的生产能力, 降低生产损耗和库存, 成为提高此类企业竞争力的关键问题. 许多研究机构和学者开展了针对冷轧生产计划与调度的研究, 但是其研究成果多数是针对特定机组调度问题[1−2], 而适合全流程合同计划的成果较少. 文献 [3] 虽然研究了冷轧整个生产线的排产过程, 但是所研究的对象主要是针对批量彩板生产合同计划排产过程. 文献 [4] 对连续退火机组到镀锌机组单流向生产线的计划调度问题进行了研究. 文献 [5−6] 分别探讨了冷轧生产中的全流程合同计划方法, 对中间库存与机组状态的变化仍然缺少一定的灵活性. 冷轧生产过程非常复杂, 而且各个企业生产过程不尽相同, 使得上述方法很难满足不同企业生产多种产品的要求.

本文针对冷轧薄板企业按合同数据中指定的流向组织生产会出现流向产能分配不均, 同时存在企业机组定修和突发故障等问题, 把各个生产机组看作生产模块, 有可替代生产能力的相似生产机组看作可重构机组, 建立部分重构混杂 Petri 网 (Partly reconfigurable hybrid Petri net, PRHPN) 生产调度模型, 以实现不同生产流向部分重构的生产规划与动态调度. 对重构过程, 提出了有限搜索蚁群算法 (Finite-searching ant colony optimization, FSACO), 根据机组产能与停机时间变化, 通过调节合同生产过程在原机组与可重构机组之间的分配比例, 实现机组产能再分配与合同的重调度过程. 将本文提出的方法与文献 [7] 中提出的冷轧生产全流程合同计划排产方法相结合, 通过上海宝钢冷轧薄板厂的应用测试, 表明本文提出的方法可以提高冷轧生产全流程合同计划与调度的效果, 从而提供更加可行的合同计划方案.

1 冷轧生产过程与问题描述

冷轧生产过程既有连续生产过程, 又有离散生产

收稿日期 2010-02-02 录用日期 2010-08-13
Manuscript received February 2, 2010; accepted August 13, 2010
国家自然科学基金 (61034003) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61034003)
1. 大连理工大学信息与控制研究中心 大连 116024
1. Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116024

的部分特征, 属混合型生产过程[8], 这种生产系统又可以被称为混杂生产系统[9]. 图 1 显示了某冷轧薄板厂主要生产流程和主要产品. 根据最终产品的分类, 冷轧生产过程对应的主要工艺流程如下:

轧硬卷: 酸洗－冷轧;

冷轧卷 (板): 酸洗－冷轧－脱脂－罩式退火－二次冷轧;

普通涂镀卷 (板) 1: 酸洗－冷轧－脱脂－罩式退火－涂镀;

普通涂镀卷 (板) 2: 酸洗－冷轧－连续退火－涂镀;

平整卷 (板): 酸洗－冷轧－脱脂－罩式退火－平整.

典型的冷轧生产企业, 其后续工序通常包括多个生产物流流向, 如图 1 给出的某冶金企业冷轧薄板厂, 其下游包含连续退火机组与罩式炉退火机组两个热处理工序, 使后续生产过程成为两条并行的主流向生产线, 而主流向中根据产品的不同, 又可以分解出多个子流向. 在制定合同计划过程中, 需要充分地考虑各种产品的生产流向、机组的产能分配、合同的加工顺序和不同产品间的差异, 以及各机组的停机时间与合同连续生产等问题. 由于生产过程的复杂性, 利用人工的方式, 很难制定出切实可行的合同计划. 同时, 对于整个企业, 当某个工序机组 (如平整机组) 出现突发故障、定期维护或工艺调整等情况造成停机时, 若此时可替代机组 (如二次冷轧机组) 有剩余产能, 则可以代替生产合同所需的产品. 又如 1# 和 2# 涂镀机组之间以轨道进行连接, 当某一机组具备剩余产能时, 可以进行合同生产过程重构, 实现替代生产, 以保持生产过程的连续性和更高的生产效率. 根据典型冷轧企业生产过程这一特点, 本文考虑在进行合同计划和调度过程中, 如果下游机组进行定修、突发故障和调整工艺时, 进行合同生产流向重构, 利用有剩余产能的可替代机组进行生产.

2 部分重构 Petri 网调度模型

典型的冷轧薄板厂的两个主流向中存在可替代机组, 例如: 二次冷轧机组可以实现平整机组生产过程; 通过轨道连接的两条涂镀机组, 可以完成相同的生产任务. 当部分可替代机组产能没有完全发挥时, 应用企业业务重构 (Business process redesign, BPR) 思想[10], 对这部分合同流向进行重构, 可提高机组的产能利用率.

混杂 Petri 网是近年发展起来的一类新的 Petri 网模型, 可用于解决混杂系统建模问题[11−12]. 文献 [13] 研究一阶混杂 Petri 网, 并用于求解分布式制造系统的问题. 文献 [14] 利用受控混杂 Petri 网的事件驱动与数学规划相结合的方式, 提出了适合于炼油厂等流程工业的动态调度方法.

本文根据冷轧薄板厂合同生产过程的流向要求, 以典型冷轧企业的二次冷轧、平整和涂镀机组为例, 针对二次冷轧机组可完成平整机组生产任务, 不同的涂镀机组可完成相似任务等特点, 提出部分重构混杂 Petri 网 (PRHPN) 进行建模.

表 1 为 PRHPN 的库所和变迁说明.

用◎表示连续性库所, 即各个机组的前库; ◯和⊙分别表示无托肯和有托肯的离散库所, 即各种事件的触发条件; 符号 ⧈ 表示连续变迁, 用于表示合同的加工过程等; 库所 $P_{s,dy}$ 有托肯时表示变迁 T_y 正常工作状态, 库所 $P_{f,dy}$ 有托肯时表示变迁 T_y 的不正常工作状态; 符号 □ 表示离散变迁, 用于表示各种事件的触发过程; $T_{s,dy}$ 表示机组可以工作, $T_{f,dy}$ 表示机组停止工作; ⟶ 表示合同原定生产过程的控制弧, ⇢ 表示部分生产流向重构过程的控制弧. 图 2 显示了冷轧生产过程中部分重构混杂 Petri 网模型.

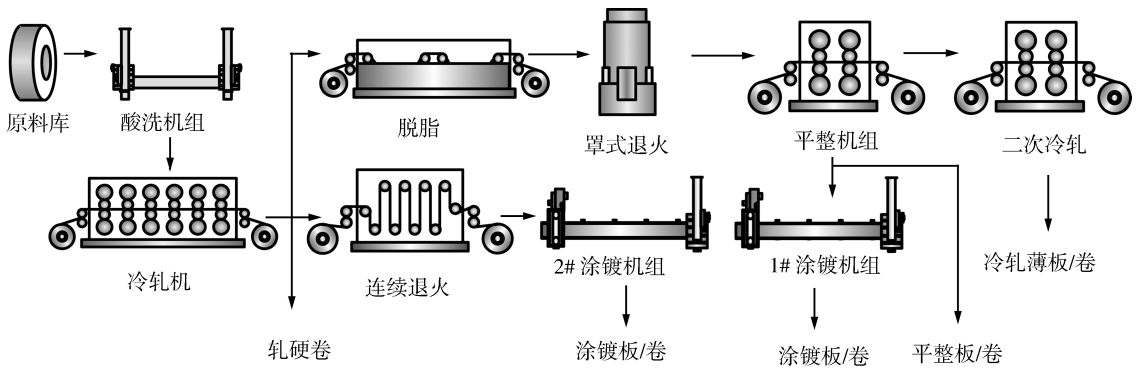

图 1 冷轧生产流程

Fig. 1 Main production flow of a cold rolling plant

表 1　PRHPN 的库所和变迁说明

Table 1　Description of places and transactions of PRHPN

库所	意义	库所	意义	变迁	意义	变迁	意义
P_1	冷轧机组前库	P_{11}	平整卷/板成品库	T_1	冷轧	T_{r1}	平整合同重构
P_2	冷轧板/卷成品	P_{12}	1# 涂镀机组成品库	T_2	连续退火	T_{r2}	1# 涂镀合同重构
P_3	连续退火前库	P_{r1}	二次轧机有剩余产能标识	T_3	脱脂	T_{r3}	2# 涂镀合同重构
P_4	脱脂前库	P_{r2}	平整合同重构标识	T_4	2# 涂镀机组	T_{r4}	禁止涂镀合同重构
P_5	2# 涂镀机组前库	P_{r3}	2# 涂镀机组有剩余产能标识	T_5	罩式退火		
P_6	罩式退火机组前库	P_{r4}	1# 涂镀机组有剩余产能标识	T_6	二次冷轧		
P_7	2# 涂镀机组成品库	P_{r5}	2# 涂镀合同重构	T_7	平整		
P_8	二次冷轧机组前库	P_{r6}	1# 涂镀合同重构	T_8	1# 涂镀机组		
P_9	平整机组前库	P_{r7}	禁止合同重构标识				
P_{10}	1# 涂镀机组前库						

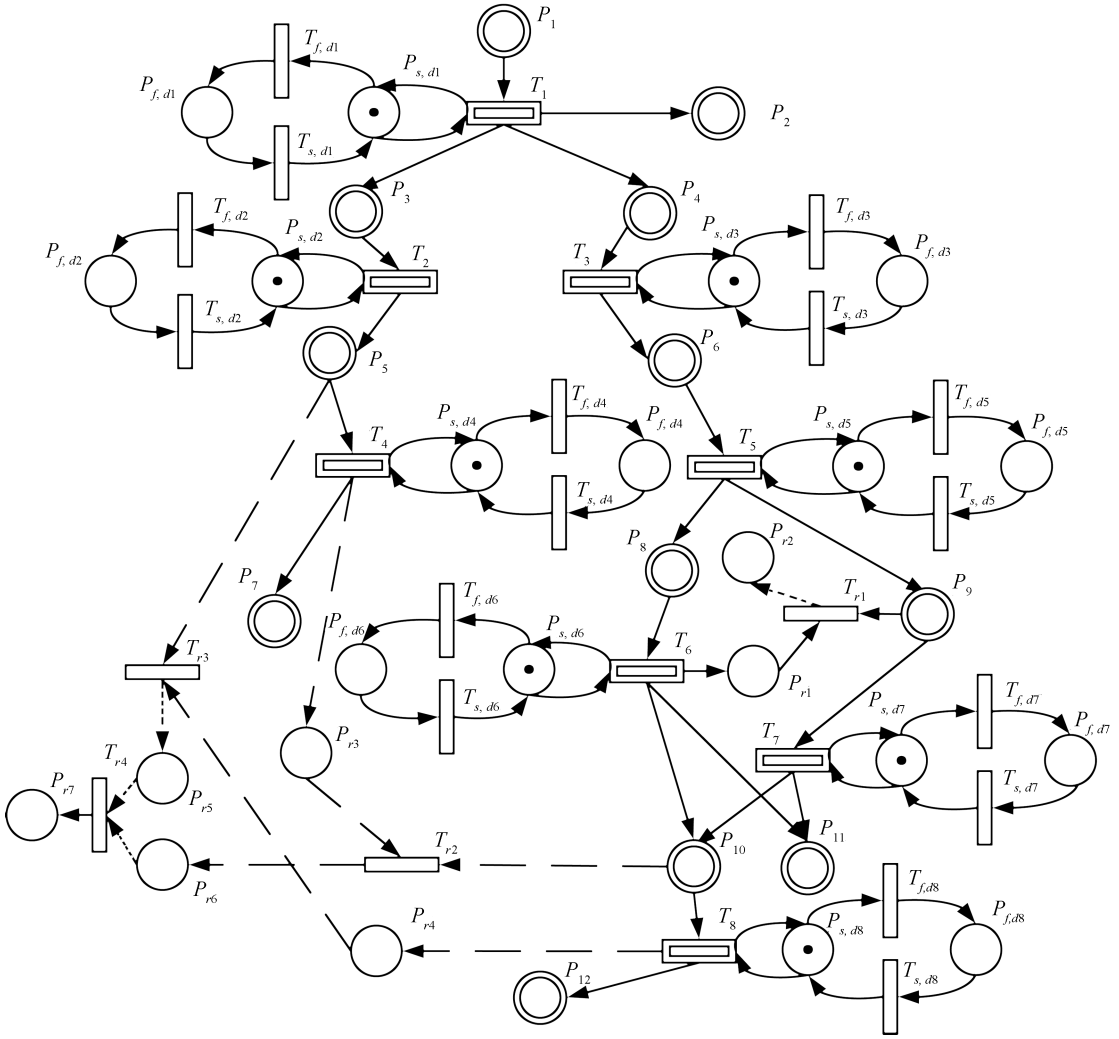

图 2　冷轧生产过程中 PRHPN 模型

Fig. 2　Model of PRHPN in process of cold rolling

为完整描述本文提出的调度方法, 给出主要涉及到的定义与假设.

定义 1. 虚拟生产重构: 利用企业业务重构的思想, 根据机组产能, 对生产合同的生产流向进行生产过程动态重构, 使合同生产过程转由替代机组生产, 而离开合同规定的生产机组, 形成逻辑上的重构关系, 称为虚拟生产重构.

定义 2. 虚拟生产流向: 由虚拟生产重构合同生产过程所经过的机组, 形成虚拟生产流向.

定义 3. 虚拟产能: 因合同的生产过程出现了生产流向重构, 从而使原流向机组的产能数据发生变化, 由此形成的产能, 称为虚拟产能.

定义 4. 重构机组对: 两个可以实现合同生产重构的机组, 即可替代机组, 称为重构机组对.

假设 1. 所有到机组前库合同都能够生产, 即没有重分配的合同由原机组按计划完成生产.

假设 2. 机组间合同重分配的费用和时间可以忽略.

假设 3. 除停机时间外, 机组的产能为一个定值.

3 部分生产重构模型与算法

冷轧生产过程中, 平整与二次冷轧机组, 1# 与 2# 涂镀机组的合同生产重构条件与过程并不相同, 形成两个重构机组对. 本文针对两个重构机组对的不同要求, 分别建立各自的合同生产重构模型.

3.1 平整与二次冷轧的重构模型

二次冷轧机组的生产特性与平整机组相似, 可以用于平整作业, 根据二次冷轧机组前库容量与产能要求, 将部分需要平整机组生产的合同, 分配给二次冷轧机组, 提高整个生产过程中的平整作业生产效率.

符号定义. $f_{\rm scr}$ 表示二次冷轧生产平整合同的目标函数值, T 为计划时间段, N_t 表示 t 日从平整机组分配到二次冷轧机组的合同数; s_t 表示冷轧机组 t 日生产过程调整标识, W_i 表示合同 i 的重量, SCR_t 表示 t 日的可进行平整生产的产能; $inv_{{\rm scr},t}$ 表示 t 日从平整机组重定向到二次冷轧机组的合同量, $SH_{\rm scr}$ 表示二次冷轧机组前库的最大库存量, $SL_{\rm sp}$ 表示平整机组前库的最小库存量; $ST_{{\rm scr},t}$ 表示二次冷轧机组 t 日的前库库存量, $ST_{{\rm sp},t}$ 表示 t 日平整机组前库库存量, $CP_{\rm scr}$ 表示二次冷轧机组的生产能力.

$$s_t=\begin{cases}1, & \text{机组生产调整}\\ 0, & \text{否则}\end{cases}$$

$$x_{it}=\begin{cases}1, & t\ \text{日将合同重定向给二次冷轧机组}\\ 0, & \text{否则}\end{cases}$$

二次冷轧机组代替平整生产过程合同选择的目标函数:

$$f_{\rm scr}=\omega_1\cdot\alpha\cdot\min\sum_{t=1}^{T}s_t+\omega_2\cdot\beta\cdot\min\left(\sum_{t=1}^{T}|\sum_{i=1}^{N_t}W_ix_{it}-SCR_t|\right)\tag{1}$$

s.t.

$$(inv_{{\rm scr},t}+ST_{{\rm scr},t})\le SH_{\rm scr}\tag{2}$$

$$SL_{\rm sp}\le(ST_{{\rm sp},t}-inv_{{\rm scr},t})\tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{N_t}W_ix_{it}\le CP_{\rm scr}\tag{4}$$

为使两个子目标值处于同一个数量级, 以使不同子目标对总目标函数具有相同的影响, 令 α 和 β 分别表示两个子目标值的压缩系数, 统一两个子目标值的数量级; ω_1 和 ω_2 分别表示子目标的重要程度, 且 $\omega_1+\omega_2=1$.

式 (1) 由两个子目标组成, 其中第 1 项表示二次冷轧机组, 生产不同产品时机组调整次数最少, 即表示合理地为二次轧机选择指标变化平稳的生产合同, 第 2 项表示尽可能满足二次冷轧机组产能的要求; 式 (2) 表示从平整机组重定向到二次冷轧机组的生产合同量与其本身前库合同量之和, 不能超过二次轧机前库库存能力的上限; 式 (3) 表示 t 日从平整机组前库中部分合同重定向到二次轧机后, 其剩余合同量不能小于其前库的最低库存; 式 (4) 表示 t 日分配给冷轧机组的合同量不能超过二次冷轧机组的生产能力.

3.2 涂镀机组的多机并行重构模型

典型的冷轧薄板厂中, 按照退火方式, 同时存在两个主生产流向, 分别是罩式退火流向和连续退火流向, 如图 1 所示. 在两个主流向中, 都存在镀铬机组和镀锡机组, 两个主流向间的镀铬机组之间有轨道连接, 同时镀锡机组之间也有轨道连接, 这为实现两个流向中涂镀机组的重构提供了基础条件. 因镀铬与镀锡机组的生产特征相似, 因此, 两种机组的生产重构采用统一的目标函数. 通过重构生产流向, 提高设备利用率, 平衡两个流向的产能.

符号定义. f_m 表示生产流向重构生产时涂镀机组的目标函数值, T 为计划时间段, N_t 表示 t 日从平整机组分配到二次冷轧机组的合同数; W_i 表

示合同 i 的重量, $m=\{1,2,3,4\}$ 分别表示 1# 镀锡、1# 镀铬、2# 镀锡和 2# 镀铬; P_{mt} 表示 t 日的 m 机组可供重构分配的剩余产能; inv_{mt} 表示 t 日重定向到 m 机组的合同量, wp_{mt} 表示机组 t 日可以生产的原流向合同量, m' 表示生产合同原流向机组标识, 所表示的机组与 m 相同, SH_m 表示 m 机组前库的最大库存量, $SL_{m'}$ 表示 m' 机组前库的最小库存量; W_i 表示合同 i 的重量, ST_{mt} 表示 m 机组 t 日的前库库存量, $ST_{m't}$ 表示 m' 机组 t 日的前库库存量, CP_m 表示 m 机组的生产能力.

$$x_{mit}=\begin{cases}1, & t \text{ 日将合同 } i \text{ 重定向给 } m \text{ 机组}\\ 0, & \text{否则}\end{cases}$$

镀铬与镀锡机组生产重构目标函数:

$$f_m=\omega_1\cdot\alpha\cdot\min\left(\sum_{t=1}^{T}\left|\sum_{i=1}^{N_t}\sum_{m=1}^{4}W_i x_{it}-SCR_t\right|\right)+\omega_2\cdot\beta\cdot\min\sum_{m=1}^{4}\left(\frac{\sum_{t=1}^{T}(CP_m-inv_{mt}-wp_{mt})}{T}\right) \tag{5}$$

s.t.

$$(inv_{mt}+ST_{mt})\le SH_m \tag{6}$$

$$SL_{m'}\le(ST_{m't}-inv_{mt}) \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{N_t}W_i x_{mit}\le CP_m \tag{8}$$

为使两个子目标值处于同一个数量级, 以使不同子目标对总目标函数具有相同的影响, 令 α 和 β 分别表示两个子目标值的压缩系数, 统一两个子目标值的数量级; ω_1 和 ω_2 分别表示子目标的重要程度, 且 $\omega_1+\omega_2=1$.

式 (5) 由两个子目标组成, 第 1 项表示尽可能不要超出机组产能限制, 第 2 项表示没有利用上的产能尽可能小, 即最大化涂镀机组产能; 式 (6) 表示重定向 m 机组的生产合同量与 m 机组前库合同量之和, 不能超过库存能力的上限; 式 (7) 表示 t 日从 m' 机组前库中部分合同重定向到 m 机组后, 其前库中剩余合同量不能小于前库的最低库存; 式 (8) 表示 t 日分配给 m 机组的合同量不能超过机组的生产能力.

3.3　实现重构生产的有限搜索蚁群算法

蚁群算法 (Ant colony optimization, ACO) 是 20 世纪 90 年代提出的智能优化算法, 在解决多目标组合优化问题时, 显示出明显的求解能力[15−17]. 较其他进化计算方法而言, 蚁群算法可以方便地处理约束条件, 更好地利用问题的启发式信息, 在解决大规模组合优化与调度问题中显示了更大的优势[18−19]. 本文工业背景中, 对可重构合同的搜索过程, 蚁群算法基于解空间模型进行搜索, 可在建立解的过程中, 利用约束条件, 指导算法搜索方向、搜索节点数量、控制候选解个体长度规模以及设置搜索停止条件等, 建立不同长度的解的种群, 从而更容易得到最优解.

本文提出一种有限搜索蚁群算法 (FSACO), 适合于出现部分重组生产特征的冷轧生产过程. 利用本文提出的方法, 在文献 [7] 基础上, 通过可替代生产机组生产过程重组, 对罩式退火生产和连续退火两个核心生产流向进行再调度.

将平整机组、各涂镀机组前库的生产合同作为蚁群算法的食物, 按日采取有限滚动搜索策略, 以机组的当日可重分配产能看作蚁群当天需求食物的总量, 令可搜索合同的信息素 τ 的初值和启发值 η 都是与时间有关的变量, 指导算法的初始搜索方向. 蚁群查看机组可利用产能以及可重分配合同量, 从而实现不同机组的产能重分配和生产线重构, 形成滚动式的排产调整过程.

1) 启发值

根据合同大小和到达时间设定搜索日的待选择合同的启发值.

$$\eta_{it}=\begin{cases}\dfrac{W_i}{CP_m-C_{mt}}+\displaystyle\sum_{q=1}^{3}\frac{1}{SP_{qi}-SP_{qj}}, & \text{平整机组重构 } (RT_i-t)\le 3\\ \dfrac{W_i}{CP_m-C_{mt}}, & \text{涂镀机组重构 } (RT_i-t)\le 3\\ 0, & (RT_i-t)>3\end{cases} \tag{9}$$

其中, η_{it} 表示 t 日选择生产合同 i 的启发值, CP_m 表示机组 m 产能, C_{mt} 表示 t 日机组 m 生产本流向合同已经利用的产能, W_i 表示合同 i 的重量. $q=\{1,2,3\}$ 分别表示合同钢板的宽度、厚度和硬度指标标识, j 在重构起始时表示原二次冷轧机组在产的最后一个合同, 然后表示平整生产流向中已经加入二次冷轧机组生产的合同. SP_q 表示合同的第 q 个指标. 其中 RT_i 表示合同 i 到达机组前库日期, t 表示搜索日期. 对已经到达前库 3 天以上的合同, 将不进行生产重构, 设其启发值为 0.

2) 信息素初始值

信息素初值成为与调度日期相关的变值, 增加

先到合同在初始搜索时的选择概率

$$\tau_0 = \begin{cases} C^{|RT_i - t|} + C, & (RT_i - t) \le 3 \\ 0, & (RT_i - t) > 3 \end{cases} \tag{10}$$

其中, RT_i 表示合同 i 到达机组前库日期, t 表示搜索日期, C 为一个比较大的值. 对已经到达前库 3 天以上的合同, 将不进行生产重构, 设其初始信息素值为 0.

3) 信息素更新规则

算法求解中, 采用最优解更新信息素规则

$$\tau_{it}(k+1) = (1-\rho)\tau_{it}(k) + \rho\Delta\tau_{it} \tag{11}$$

其中, $\tau_{it}(k+1)$ 表示合同 i 在第 t 日更新后的信息素值, $\tau_{it}(k)$ 表示合同 i 在第 t 日的原信息素值, N 为生产合同总数, ρ 表示信息素的挥发系数, $\Delta\tau_{it}$ 表示至今最优解的信息素的增加值, 令 $\Delta\tau_{it} = 1/N$.

4) 搜索范围限制条件

在考虑生产流向重构的同时, 必须保证原生产流向的连续生产, 因此, 对蚁群搜索规模进行限制: 只搜索已经进入机组前库的待重构合同; 对于在库 3 天以上的合同不再搜索; 本机组前库库存达到上限不进行搜索; 保持机组前库库存大于下限; 两组机组同一日期都有空余产能时, 两个机组之间不进行重构合同搜索.

5) 合同选择模型

在不同时期, 利用下式选择合同:

$$P_{it} = \frac{\tau_{it}^{\alpha} \cdot \eta_{it}^{\beta}}{\sum\limits_{i \in N_t} \tau_{it}^{\alpha} \cdot \eta_{it}^{\beta}} \tag{12}$$

其中, τ_{it} 表示 t 日合同 i 上的信息素, η_{it} 表示 t 日合同 i 上的启发值, 此处 α 和 β 分别表示 τ 和 η 的重要程度, P_{it} 表示 t 日选择合同 i 的概率, N_t 表示 t 日可供选择的合同集合.

3.4 部分重构特征的合同计划编制的实现步骤

将本文所建立的利用合同生产流程重构方法与全流程合同计划和调度相结合, 完成静态的合同计划编排, 同时, 实现平整与二次冷轧机组、涂镀机组的生产过程动态调度. 实现合同计划与调度过程的步骤如下:

步骤 1. 对合同数据进行组批, 将小批量、多品种合同组合成相对更加适合于连续生产的大批量合同, 形成生产合同;

步骤 2. 计算当前库存和各生产流向可供持续生产时间, 计算各生产流向的最晚投料时间, 计算各生产流向可提供的有效生产时间;

步骤 3. 根据文献 [7] 中的方法, 按照合同数据的虚拟流向、机组的虚拟产能字段和月度可剩余生产时间实现合同排产;

步骤 4. 利用有限搜索蚁群算法 (FSACO), 对可重构机组中合同生产数据进行调整, 建立合同生产过程的虚拟重构;

步骤 5. 调整合同数据的虚拟生产流向字段和机组数据的虚拟产能字段;

步骤 6. 重复步骤 3, 直到达到最大迭代次数, 输出最优排产结果;

步骤 7. 监控生产过程, 遇到故障停机、紧急改换生产工艺等事件, 计算月度剩余生产时间, 返回步骤 3.

4 实例仿真研究

为了说明上述模型与算法的可行性, 将本文给出的基于部分重构产能调度方法与文献 [7] 中的全流程合同计划排产方法相结合, 对得到的合同计划方案进行重调度, 实现针对计划停机、机组调试、生产模式切换等情况, 以及出现紧急故障和调整工艺等问题的动态调度, 从而完成合同计划与调度过程的再调度. 利用上海宝钢冷轧薄板厂七个月的实际生产数据作为实例, 对实现整个生产合同的计划与调度过程进行测试, 各月份的合同总量可以满足充分发挥各流向理论生产能力的要求. 数据中已经包含了定期维修、生产模式切换、机组调试等静态时间数据, 并且, 为使测试过程与实际生产过程相似, 将原生产数据中的故障停机、紧急改换生产工艺等时间数据作为动态调度依据, 加入到测试过程中. 测试目标仍然采用文献 [7] 中的子目标与总目标, 分别是交货期提前与拖期惩罚, 冷轧机组生产不同生产流向产品进行调整的次数, 满足各流向产能的程度等三个子目标, 以及三个子目标的加权和. 所选的合同数据中, 产品宽度为 700 ~ 1 040 mm, 厚度为 0.15 ~ 0.90 mm. 每个合同的重量和介于 20 ~ 1 000 吨. 算法利用 C++ 语言实现, 运行环境是 IBM 服务器, 双核 Xeon 2.8 GHz 处理器, 带有 4 GB 内存.

表 2 显示了可部分重构机组七个月中, 可供重构合同生产流向的停机时间数据, 以小时为单位, 其中的统计结果计算了停机时间大于 2 小时以上的数据.

从表 2 中可以看出, 月度合同生产过程中, 由于都有定修日期、生产模式切换、生产工艺调整、机组调试、紧急故障停机时间等问题, 可重构机组, 其停机时间往往都在几个小时以上, 在全天停机天数中, 四个机组的 24 小时连续停机天数总和超过 20 天, 这造成生产过程的不连续性. 而合同计划与调度过程常忽略这一问题, 使计划结果与实际生产过程差别较大, 或者需要人工对计划结果进行调整, 降低了

自动合同排产过程中的灵活性和适应性, 同时降低了计划与调度结果的可行性.

表 2 样本合同数据停机时间说明

Table 2 Description of down time of sample orders

序号	合同数	平整机组	二次冷轧机组	1# 涂镀机组	2# 涂镀机组	全天停机天数
1	502	441.6	341.8	126.3	222.7	23
2	637	478.4	208.9	71.5	281.7	24
3	662	449.5	281.7	53.3	343.6	23
4	631	398.2	373.2	66.3	403.5	29
5	557	489.6	171.5	134.8	203.6	23
6	616	199.2	171.9	248.3	114.9	20
7	583	298.7	97.1	42.2	133.4	22

表 3 将本文提出的有限搜索蚁群算法与经典遗传算法、禁忌搜索算法实现的合同重构结果总目标值进行对比, 是为了能够利用遗传算法和禁忌搜索算法的特性, 根据月份定修时间与合同数据, 设定重构合同数量, 即设定固定的种群个体长度. 从表 3 中可以看出, 遗传算法与禁忌搜索算法需要固定长度的种群个体, 而长度值又是根据定修与故障时间、合同规模得出的估计值, 因此在本文的工业背景下, 其搜索结果改进不大, 甚至个别解中出现更差的结果, 而有限搜索蚁群算法, 更加适合于本文所涉及工业背景下的生产合同重构过程.

表 3 不同算法搜索结果对比

Table 3 Comparison of results among algorithms

序号	合同数	遗传算法	禁忌搜索	有限搜索蚁群算法
1	502	5.01	4.95	4.92
2	637	5.40	5.44	5.33
3	662	5.94	5.71	5.65
4	631	5.70	5.18	5.07
5	557	4.78	4.83	4.50
6	616	5.40	5.26	5.12
7	583	5.11	5.27	4.91

表 4 显示了由调度员的人工排产结果、单独使用全流程合同计划排产方法[7] 的排产结果以及将本文中方法结合到全流程合同计划排产方法中进行计划排产的目标结果. 表 4 中, Sum 表示三个子目标的加权和; Time, Num, Cap 分别表示三个子目标值: 交货期提前与拖期惩罚, 冷轧机组生产不同生产流向产品进行调整的次数, 以及满足各流向产能的程度.

通过在全流程合同排产过程中加入本文提出的方法, 使之作为系统的一个子模块, 嵌入到全流程计划与调度排产系统中, 得到的目标函数值比单独使用文献 [7] 全流程合同计划方法排产的结果平均小 10 %, 目标值越小, 合同计划排产结果越好. 从表 4 可以看出, 利用本文的方法, 根据机组开停机变化, 对部分可重构机组的合同生产流程进行重构, 实现产能的合理调整, 提高了机组利用率和全流程排产的灵活性, 用以调整整个企业生产流向的产能分配, 解决了已指定生产流向的合同量与该流向机组产能不符的问题. 同时也可以满足部分机组定修时, 合同生产停顿对合同生产过程的影响, 更有利于完成全流程的合同重调度, 制定更加有效的合同生产调度方案.

5 结论

针对冷轧薄板厂实际生产过程仅根据合同生产流向数据组织生产, 造成的各流向生产合同分布不均等问题, 以及机组定修和突发故障等情况, 建立了部分重构混杂 Petri 网 (PRHPN) 生产调度模型. 利用提出的有限搜索蚁群算法 (FSACO), 在不同生产流向的可替代机组之间, 根据机组的产能负荷, 对合同的生产流向进行部分重构, 实现合同生产的再规划与动态调度, 同时也较好地解决了停机定修和突发故障时的产能分配问题. 将本文提出的方法与全流程合同计划排产方法[7] 相结合, 通过上海宝钢冷轧薄板厂的应用测试和仿真结果, 表明了本文方法对提高冷轧全流程合同调度效果的可行性.

表 4 不同方法生产计划的目标函数值比较

Table 4 Comparison of three methods

序号	调度员人工排产结果				单独使用文献 [7] 的结果				本文方法的调度结果			
	Sum	Time	Num	Cap	Sum	Time	Num	Cap	Sum	Time	Num	Cap
1	6.68	10.5	7.3	3.01	5.12	8.56	5.8	2.37	4.92	8.06	5.4	2.21
2	6.05	12.5	8.8	2.70	5.63	10.3	7.0	2.44	5.33	9.83	6.2	2.14
3	5.41	15.6	9.0	2.22	5.97	9.26	7.6	1.80	5.65	9.06	7.1	1.70
4	6.79	15.3	8.9	2.93	5.67	13.8	8.3	2.23	5.07	12.3	7.5	2.01
5	6.42	12.4	8.7	2.74	4.93	9.61	7.1	2.13	4.50	8.70	6.6	1.93
6	6.63	13.6	8.5	2.89	5.36	11.3	8.0	2.34	5.12	10.5	7.5	2.01
7	6.44	10.5	8.0	2.89	5.48	10.2	7.3	2.21	4.91	9.82	6.7	2.02

References

1 Liu Q L, Wang W, Zhan H R, Wang Z G, Liu R G. Optimal scheduling method for a bell-type batch annealing shop and its application. *Control Engineering Practice*, 2005, **13**(10): 1315−1325

2 Wang D D, Tieu A K, Boer F G, Ma B, Yuen W Y D. Toward a heuristic optimum design of rolling schedules for tandem cold rolling mills. *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 2000, **13**(4): 397−406

3 Tang L X, Wang X P. Simultaneously scheduling multiple turns for steel color-coating production. *European Journal of Operational Research*, 2009, **198**(3): 715−725

4 Verdejo V V, Alarco M A P, Sorli M P L. Scheduling in a continuous galvanizing line. *Computer and Operations Research*, 2009, **36**(1): 280−296

5 Zhao Jun, Liu Quan-Li, Wang Wei. Models and algorithms of production scheduling in tandem cold rolling. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(5): 565−573

6 Liu S X, Tang J F, Song J H. Order-planning model and algorithm for manufacturing steel sheets. *International Journal of Production Economics*, 2006, **100**(1): 30−43

7 Wang L, Zhao J, Wang W. Order planning model and algorithm of whole process of cold rolling. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control Express Letters*, 2009, **3**(3B): 657−662

8 Shi Hai-Bo, Ma Yu-Lin, Liu Ai-Guo. Research on the structure and method of production planning and scheduling for cold-rolled sheets plant. *Information and Control*, 2004, **33**(1): 31−35
(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. 信息与控制, 2004, **33**(1): 31−35)

9 Cheng Shu. Results and perspectives of hybrid systems and their applications in manufacturing systems. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2008, **14**(5): 937−943
(程曙. 混杂系统理论及其应用于制造系统的研究进展. 计算机集成制造系统, 2008, **14**(5): 937−943)

10 Reijers H A, Mansar S L. Best practices in business process redesign: an overview and qualitative evaluation of successful redesign heuristics. *Omega*, 2005, **33**(4): 283−306

11 Balduzzi F, Giua A, Menga G. First-order hybrid Petri nets: a model for optimization and control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, **16**(4): 382−399

12 Allam M, Alla H. Modeling and simulation of an electronic component manufacturing system using hybrid Petri nets. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1998, **11**(3): 374−383

13 Dotoli M, Fanti M P, Giua A, Seatzu C. First-order hybrid Petri nets: an application to distributed manufacturing systems. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 2008, **2**(2): 409−430

14 Zhang Jin-Song, Li Qi-Qiang, Wang Zhao-Xia, Guo Qing-Qiang. An event driven modeling method for refinery dynamic scheduling based on controlled hybrid Petri nets. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2008, **35**(1): 8−11
(张劲松, 李歧强, 王朝霞, 郭庆强. 基于受控混杂 Petri 网的事件逻辑驱动的炼油厂动态调度建模方法. 化工自动化及仪表, 2008, **35**(1): 8−11)

15 Dorigo M, Birattari M, Stutzle T. Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2006, **1**(4): 28−39

16 Yagmahan B, Yenisey M M. Ant colony optimization for multi-objective flow shop scheduling problem. *Computers and Industrial Engineering*, 2008, **54**(3): 411−420

17 Doerner K, Gutjahr W J, Hartl R F, Strauss C, Stummer C. Pareto ant colony optimization: a metaheuristic approach to multiobjective portfolio selection. *Annals of Operations Research*, 2004, **131**(1−4): 79−99

18 Lin B M T, Lu C Y, Shyu S J, Tsai C Y. Development of new features of ant colony optimization for flowshop scheduling. *International Journal of Production Economics*, 2008, **112**(2): 742−755

19 Berrichi A, Yalaoui F, Amodeo L, Mezghiche M. Bi-objective ant colony optimization approach to optimize production and maintenance scheduling. *Computers and Operations Research*, 2010, **37**(9): 1584−1596

王 利 大连理工大学信息与控制研究中心博士研究生. 主要研究方向为智能算法, 计算机集成制造系统, 生产计划与调度, 智能优化与应用.
E-mail: wangli_ly@126.com
(**WANG Li** Ph. D. candidate at the Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology. His research interest covers intelligent algorithms, computer integrated manufacturing system, industrial production planning and scheduling, and intelligent optimization and application.)

赵 珺 大连理工大学信息与控制研究中心讲师. 主要研究方向为工业生产过程调度, 计算机集成制造系统, 智能优化与应用. 本文通信作者.
E-mail: zhaoj@dlut.edu.cn
(**ZHAO Jun** Lecturer at the Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology. His research interest covers industrial production scheduling, computer integrated manufacturing system, and intelligent optimization and application. Corresponding author of this paper.)

王 伟 大连理工大学信息与控制研究中心教授. 主要研究方向为流程工业生产过程建模与控制, 计算机集成制造系统和智能控制.
E-mail: wangwei@dlut.edu.cn
(**WANG Wei** Professor at the Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology. His research interest covers adaptive control, computer integrated manufacturing system, and computer control of industrial process.)