

# 钢铁企业 MTO-MTS 混合合同计划管理模式研究<sup>①</sup>

张涛<sup>1</sup>, 陈琦<sup>1</sup>, 黄颖雷<sup>2</sup>, 张玥杰<sup>3</sup>, 汪定伟<sup>4</sup>

- (1. 上海财经大学信息管理与工程学院, 上海 200433; 2. 上海宝信软件股份有限公司, 上海 200040;  
3. 复旦大学计算机科学技术学院, 上海 200433; 4. 东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

**摘要:** 基于钢铁企业生产计划组织流程, 提出 MTO-MTS 混合合同计划管理模式; 分别建立了基于 MTO 管理模式和 MTO-MTS 混合管理模式的合同计划混合整数规划模型, 模型中以提前/拖期惩罚、库存成本、生产能力未充分利用惩罚、库存匹配费用、合同取消惩罚总额最小为目标, 同时考虑库存余材匹配和生产计划, 并设计了对非可行解进行启发式修复的改进粒子群算法求解策略. 仿真实验首先对参数设置进行分析, 然后对多组数据进行实验, 结果表明 MTO-MTS 管理模式能够规避需求预测不准确的风险, 可以协调快速交货和降低库存的矛盾, 更能适应客户需求多品种、小批量的发展趋势.

**关键词:** 面向订单; 面向库存; 合同计划; 库存匹配; 粒子群算法

**中图分类号:** C934   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1007-9807(2013)06-0035-11

## 0 引言

钢铁工业是中国国民经济的支柱产业, 随着全球经济一体化进程的加快, 钢铁企业面临着更加激烈的竞争. 现代钢铁市场对产品的需求日益呈多品种、小批量化, MTO (make to order) 管理模式可以很好地应对这种需求特点, 满足客户个性化需求的目的, 避免生产的盲目性. 文献[1]建立基于 MTO 管理系统的钢铁企业合同计划编制的整数规划模型, 以最小提前、拖期惩罚为目标, 提出基于可重复自然数编码的遗传算法对模型进行求解. 文献[2]建立多目标的合同计划模型(包括最小拖期、产能有效利用、最小库存费用). 文献[3]基于 MTO 模式, 针对炼钢与热轧生产及其衔接方式的特点, 考虑能力和两个阶段冲突约束条件下, 对炼钢热轧的生产与物流进行一体化的建模和求解.

但是, 市场对企业还提出快速响应的要求, 产品的客户化和快速响应在生产系统中相互矛盾. MTO-MTS 混合管理模式兼顾 MTO 和 MTS (make to stock) 既满足客户对产品多样性和短交货期的多重要求, 又充分利用 MTS 生产的批量经济性, 最大化使用设备能力等优点, 达到生产与销售的平衡<sup>[4]</sup>.

MTO 和 MTS 如何有效结合是成功实现 MTO-MTS 混合策略的重点. 从相关文献来看, 有关钢铁企业 MTO-MTS 混合模式的研究较少, 但食品、电子、机械等行业中已有较多研究, 具有一定的借鉴价值.

文献[5]研究混合 MTO-MTS 环境下生产计划系统的设计, 目的是缩短 MTO 产品的生产时间和控制 MTS 产品的拖期率, 提出了分层生产计划模型. 文献[6]将食品生产计划问题看作一个单机问题, 在需求不确定的情形下, 考虑基于顺序的

① 收稿日期: 2010-06-07; 修订日期: 2012-03-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71171126; 61170095); 国家自然科学基金重点资助项目(70931001); 教育部留学回国人员科研启动基金: 上海市自然科学基金资助项目(09ZR1420400); 上海市哲学社会科学规划项目(2011BGL015).

作者简介: 张涛(1970—), 男, 河南鹤壁人, 博士, 副教授. Email: taozhang@mail.shufe.edu.cn

机器设置时间,提出 MTO-MTS 生产模式下的分层计划框架,研究生产—库存策略,生产管理系统的性能主要根据能力利用率、合同按时交货率及库存占用率来衡量.文献[7]以荷兰某食品企业为背景,研究一种生产计划和库存控制架构,建立 MTO-MTS 相结合的生产计划和调度系统架构,并提出一种启发式算法解决短期批量调度问题.文献[8]研究复杂供应网络中的多退耦点问题,建立确定 MTO-MTS 混合环境中多退耦点的数学模型.结果表明,在动态供应网络和严格的交货期要求环境中,混合生产模式比纯粹的 MTO 或者 MTS 模式更加有效.文献[9]采用基本库存控制规则来控制 MTS 产品的生产,采用先到先服务的规则生产 MTO 产品;并采用 MTS 需求的满足率和 MTO 产品的按时完成率作为服务质量的评价标准,利用马尔可夫链系统来优化基本库存水平.

在 MTO-MTS 环境中,合同计划不能仅考虑已有的客户订单,为了生产能力最大化和物流平衡,还需考虑一些 MTS 订单,协调 MTO 订单与 MTS 订单以及库存和生产.当存在半成品库存或成品库存时,需要充分利用已有库存,达到控制库存和提高客户响应速度的目的.由此,库存匹配问题也是一个关键研究点.文献[10]研究钢铁企业生产计划的剩余库存匹配,包括半成品库存匹配和成品库存匹配,目标是最大化被匹配合同的总重量、最小化物料浪费(切割过程中产生).但这是单纯的匹配问题,而在钢厂合同计划中需要同时考虑库存匹配和生产计划编制.文献[11]把整个生产流程抽象成一道工序,假设合同从原料投入到成品产出均在一个时间单位内完成,将库存匹配和生产计划联合考虑,解决钢厂在非均匀需求下的库存和产能利用问题.文献[12]考虑钢厂多工序生产,合同计划中同时考虑成品库存匹配和生产计划,并构造可修复粒子群算法和禁忌搜索算法来解决该问题.但是,这些文献中仅考虑了成品的库存匹配,而未考虑半成品匹配,还不属于严格意义上的 MTO-MTS 混合管理方法. Meredith 等在 MTO-MTS 结合的基础上,提出了按预测生产 MTF (make to forecast) 生产计划体系<sup>[13]</sup>,着重

分析了将不同半成品匹配给客户订单的匹配规则.钢铁行业有自身的特点,不确定性是影响钢铁企业库存的一个重要因素, Denton 研究了进行一体化生产的钢铁企业( ISMs) 中的半成品匹配问题<sup>[14,15]</sup>,认为板坯经过后续加工后可以生产多种产品,后续轧制成材阶段又呈现离散生产方式特点,对部分板坯进行预测是可行的.本文提出的钢铁企业 MTO-MTS 混合生产环境中,最重要的一环是以半成品预测代替成品预测,需要同时考虑半成品库存匹配和生产计划,订单的工艺路线将呈现多样性,使问题变得更加复杂.

综上所述,当前研究还存在以下问题值得进一步深入研究: 1) 针对钢铁企业生产管理模式的的研究较少,缺乏管理模式在钢铁行业中的经济性研究; 2) 仍然以 MTO 管理模式作为研究合同计划的基础,鲜有对 MTO-MTS 混合管理模式的研究; 3) 即使研究合同计划中的库存匹配,一般仅考虑成品库存,缺乏关于钢铁行业市场发展方向的前瞻性研究.本文以快速满足客户需求、控制库存、降低成本为目标,比较 MTO 和 MTO-MTS 合同计划管理模式(由于目前钢铁企业中很少采用 MTS 模式来组织生产,本文不再深入分析单纯的 MTS 管理模式),以期为企业采用适用的管理模式提供借鉴.

## 1 MTO-MTS 和 MTO 合同计划管理模式比较

合同计划根据合同的交货期、规格、质量、及各生产工序在各时段上的加工能力等来安排合同在各个工序的生产时间,其结果受到计划编制方法的影响,但更为重要的制约因素是生产管理模式,不同生产管理模式的的管理重点不同,直接影响企业经济效益.

在 MTO 生产管理模式,企业接受客户订单,转化为标准的生产合同后,对合同进行成品库存匹配,再编制生产计划.为提高客户响应速度,某些钢铁公司预先生产部分主要品种的库存产品,当接到订单时即可交货,他们认为,这些预测

是面向一些稳定客户的需求,能够按预期接到相应订单,因此还属于 MTO 生产模式范畴,但产品种类过多将带来预测与客户需求变化不匹配的风险.对于未预先生产库存的钢铁品种,只有接到订单后再生产,虽然可在一定程度上节约库存成本,但却影响对客户需求的反应速度.在 MTO-MTS 生产管理模式下,企业按照一定规则产生半成品预测订单,并与客户订单一起转化为标准的生产合同,然后对成品合同进行半成品匹配,并编制后续工序生产计划;对于不能进行库存匹配的半成品合同,也需要同时编制合同计划,只是这些合同的生产仅通过前部分工序(半成品生产).

这里所谓的“库存匹配”,是指企业中不可避免存在剩余库存,当接到客户订单时,可以考虑是否有足够的成品库存满足该订单,如果可以满足,则直接从库存发货满足客户,此时称通过“成品匹配”来及时满足客户需求;但如果无成品库存,而半成品有足够的库存量,则可以对半成品进行继续加工,仅需编制后续工序的生产计划,生产出成品来满足客户需求,该方式可以适当缩短交货周期,称之为“半成品匹配”;如果成品库存和半成品库存均不足以满足客户订单,则需要从炼钢开始进行全流程生产.

图 1 是两种模式下合同计划组织过程,左边部分基于 MTO-MTS 模式,右边部分基于 MTO 模式.

在 MTO 管理模式,企业将实际客户订单和预测成品订单同样处理.而 MTO-MTS 管理模式,必须确定 MTO/MTS 生产阶段的分离点,生产过程包括两个阶段:1) MTS 阶段不区分产品,生产半成品库存;2) MTO 阶段体现客户需求特殊性,需对产品进行区分和客户化.本文将板坯作为 MTS 半成品,产生部分板坯预测订单,这些订单与实际客户订单一起转化为生产合同,建立合同池.

MTO 管理模式,由于存在预测成品订单,预测的准确性将对库存成本影响很大.MTO-MTS 管理模式,进行半成品匹配的合同还需要经过后续工序的生产,导致生产工艺路线不一致,管理更加复杂.

本文的研究主要针对板材,由于板材产品种类众多,当预测有偏差时,成品匹配不能成功,可能造成大量积压库存.但由于同一种板坯可以生产多种规格的成品,因此板坯匹配成功率更高,可以及时满足客户需求,并能大大降低库存成本.

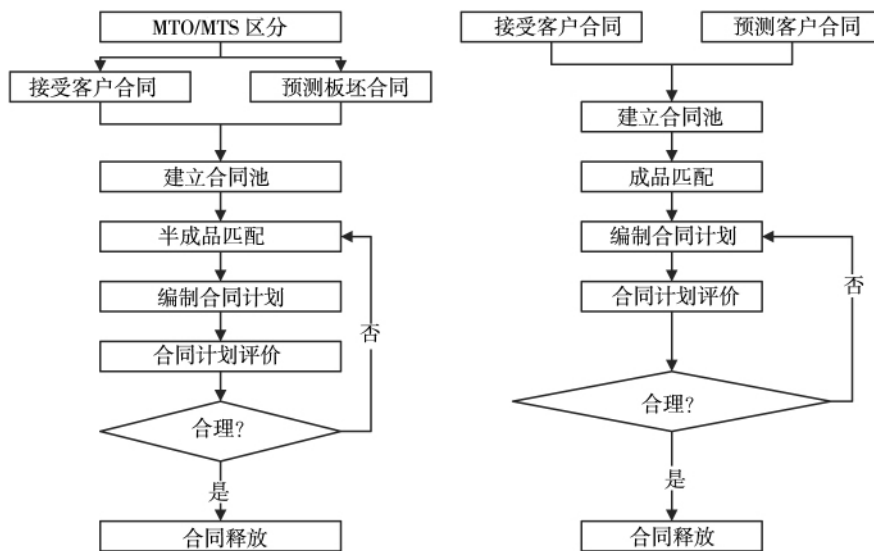


图 1 不同管理模式下的合同计划组织过程

Fig. 1 Order planning organization process under different management modes

## 2 问题描述及建模

### 2.1 问题描述

合同计划的编制概述如下: 假设计划展望期  $T$  内有  $N$  个合同需要交货, 共有  $J$  道工序、 $K$  种钢级的余材, 每个合同的重量、交货期及其生产路径、材质规格已知, 每个生产合同通过的工序确定, 每道工序的能力一定, 在满足能力约束和前序关系的前提下, 安排合同进行库存匹配(每个合同只能匹配一种库存余材)或生产(在每道工序通过的时间), 使所有合同的总惩罚最小(假设每个合同在同一时间段最多只可完成两道工序)。每个合同可以有库存匹配、生产、合同取消三种选择。

MTO 管理模式中, 合同包括预测成品订单与实际成品订单, 合同只能与成品库存进行匹配, 同一合同不能同时选择库存匹配与生产。MTO-MTS 管理模式中, 合同包括实际成品订单和半成品预测订单, 合同只与半成品库存进行匹配。

为了方便表达, 相关变量定义如下:

- $\omega_i$ —— 合同  $i$  的需求量
- $Q_k$ —— 余材  $k$  的期初库存数量
- $E_{jt}$ —— 工序  $j$  在时段  $t$  的产能
- $[a_i, b_i]$ —— 合同  $i$  的交货期窗口
- $\alpha$ —— 单位产成品拖期惩罚系数
- $\gamma$ —— 单位产成品提前惩罚系数
- $\xi$ —— 单位产成品取消惩罚系数
- $\lambda_s$ —— 单位半成品库存成本
- $\lambda_g$ —— 单位产成品库存成本
- $\mu$ —— 期望最低负荷率系数, 为  $(0, 1)$  之间的值

- $v$ —— 产能未充分发挥的惩罚系数
- $I_{jo}$ —— 第  $j$  道工序的期初库存量
- $I_{jmax}$ —— 第  $j$  道工序的最大库存量
- $J'$ —— 该工序完成后产品形态为半成品  $J' \leq J < J$
- $J_i$ —— 合同  $i$  的最后一道加工工序, 对于半成品合同  $J_i = J'$ ; 对于成品合同  $J_i = J$  定义决策变量如下:

$$Y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{合同 } i \text{ 选择与钢级为 } k \text{ 的余材匹配} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$X_{ijt} = \begin{cases} 1, & \text{合同 } i \text{ 在第 } j \text{ 道工序的时段 } t \text{ 内} \\ & \text{生产} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$$Z_i = \begin{cases} 1, & \text{合同 } i \text{ 为半成品合同} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

其中  $i = 1, \dots, N$  表示合同号  $j = 1, \dots, J$  表示工序号  $t = 1, \dots, T$  表示时间段。

设每个合同最多只能和一种库存余材匹配, 合同  $i$  所要求的钢级为  $k'$ , 实际匹配余材的钢级为  $k$ , 匹配费用定义如下:

$$C_{ik} = \begin{cases} 0 & k, k' \text{ 属于同一钢种序列, 且 } k \text{ 与 } k' \text{ 钢级相同} \\ h_{ik}g_{kk'} & k, k' \text{ 属于同一钢种序列, 但 } k \text{ 比 } k' \text{ 钢级高} \\ \infty & k, k' \text{ 不属于同一钢种序列} \end{cases}$$

其中  $g_{kk'}$  表示以好充次的单位费用  $h_{ik}$  表示合同  $i$  和钢级为  $k$  的余材的匹配量。

### 2.2 数学模型

#### 2.2.1 基于 MTO-MTS 的合同计划模型

提前拖期惩罚

$$f_1 = \sum_{i=1}^N (\omega_i \alpha \max(\sum_{t=1}^T (t - b_i) X_{ijt}, 0) + \omega_i \gamma \max(\sum_{t=1}^T (a_i - t) X_{ijt}, 0)) \quad (1)$$

取消惩罚

$$f_2 = \sum_{i=1}^N \omega_i \xi (1 - \max(\sum_{t=1}^T X_{ijt}, \sum_{k=1}^K Y_{ik})) \quad (2)$$

匹配费用

$$f_3 = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K C_{ik} Y_{ik} \quad (3)$$

库存成本

$$f_4 = \frac{T}{2} \sum_{k=1}^K \lambda_s (2Q_k - \sum_{i=1}^N h_{ik} Y_{ik}) \quad (4)$$

生产能力未充分使用惩罚

$$f_5 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J v \max((\mu E_{jt} - \sum_{i=1}^N \omega_i X_{ijt}), 0) \quad (5)$$

将上面 5 个函数相加得总目标函数

$$\min f_5 = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 \quad (6)$$

s. t.

$$\sum_{i=1}^N h_{ik} Y_{ik} \leq Q_k \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^T X_{ijt} + \sum_{k=1}^K Y_{ik} \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{ijt} \omega_i \leq E_{jt} \quad j = 1, 2, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (9)$$

$$Z_i \sum_{t=1}^T X_{ijt} = Z_i \sum_{t=1}^T X_{i(j+1)t} \quad j = 1, \dots, J-1, \\ i = 1, 2, \dots, N \quad (10.1)$$

$$Z_i \sum_{t=1}^T tX_{ijt} \leq Z_i \sum_{t=1}^T tX_{i(j+1)t} \quad j = 1, \dots, J-1, \\ i = 1, 2, \dots, N \quad (10.2)$$

$$(1 - Z_i) Y_{ik} \sum_{t=1}^T X_{ijt} = (1 - Z_i) Y_{ik} \\ j = J+1, J+2, \dots, J-1, i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

$$(1 - Z_i) Y_{ik} \sum_{t=1}^T tX_{ijt} \leq (1 - Z_i) Y_{ik} \sum_{t=1}^T tX_{i(j+1)t} \\ j = J+1, J+2, \dots, J-1, i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

$$(1 - Z_i)(1 - Y_{ik}) \sum_{t=1}^T X_{ijt} = (1 - Z_i)(1 - Y_{ik}) \sum_{t=1}^T X_{i(j+1)t} \\ j = 1, 2, \dots, J-1, i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

$$(1 - Z_i)(1 - Y_{ik}) \sum_{t=1}^T tX_{ijt} \leq (1 - Z_i)(1 - Y_{ik}) \sum_{t=1}^T tX_{i(j+1)t} \\ j = 1, 2, \dots, J-1, i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

$$Z_i \sum_{t=1}^T X_{ijt} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N, \\ j = J+1, \dots, J \quad (15)$$

$$(1 - Z_i) Y_{ik} \sum_{t=1}^T X_{ijt} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N, \\ j = 1, 2, \dots, J \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ijt} \leq 2 \quad i = 1, 2, \dots, N, t = 1, \dots, T \quad (17)$$

$$I_{j0} + \sum_{i=1}^N \left( \sum_{q=1}^t \omega_i X_{ijq} - \sum_{q=1}^t \omega_i X_{i(j+1)q} \right) \leq I_{j \max} \\ j = 1, 2, \dots, J-1, t = 1, \dots, T \quad (18)$$

其中约束 (7) 表示半成品库存匹配的数量限制; 约束 (8) 表示合同不能既匹配又完全生产, 且每个合同最多只能匹配一种板坯; 约束 (9) 表示工序的产能约束; 约束 (10.1) 和 (10.2) 表示半成品合同生产工序的时间一致性和前序关系; 约束 (11) 表示完成库存匹配后的成品合同, 必须经过后续所有工序; 约束 (12) 表示对于完成库存匹配后的成品合同, 进行后续工序加工的前序关系; 约束 (13) 和 (14) 表示对于不进行库存

匹配的成品合同, 各工序加工的时间一致性和前序关系; 约束 (15) 表示半成品合同加工不经过后续工序; 约束 (16) 表示匹配后的成品合同不经过前半部分工序; 约束 (17) 表示每个合同在同一时间段最多只可完成两道工序; 约束 (18) 表示各工序在各时间段内的在制品库存不能超过库存限制.

### 2.2.2 基于 MTO 的合同计划模型

#### 库存成本

$$f_4 = \frac{T}{2} \sum_{k=1}^K \lambda_g (2Q_k - \sum_{i=1}^N h_{ik} Y_{ik}) \quad (19)$$

#### 总目标函数为

$$\min f_5 = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 \quad (20)$$

s. t.

$$\sum_{i=1}^N Y_{ik} h_{ik} \leq Q_k \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^T X_{ijt} + \sum_{k=1}^K Y_{ik} \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^N \omega_i X_{ijt} \leq E_{jt} \\ j = 1, 2, \dots, J, t = 1, \dots, T \quad (23)$$

$$\sum_{t=1}^T X_{ijt} = \sum_{t=1}^T X_{i(j+1)t} \quad j = 1, \dots, J-1, \\ i = 1, 2, \dots, N \quad (24)$$

$$\sum_{t=1}^T tX_{ijt} \leq \sum_{t=1}^T tX_{i(j+1)t} \quad j = 1, \dots, J-1, \\ i = 1, 2, \dots, N \quad (25)$$

$$\sum_{j=1}^J X_{ijt} \leq 2 \quad i = 1, 2, \dots, N, \\ t = 1, \dots, T \quad (26)$$

$$I_{j0} + \sum_{i=1}^N \left( \sum_{q=1}^t \omega_i X_{ijq} - \sum_{q=1}^t \omega_i X_{i(j+1)q} \right) \leq I_{j \max} \\ j = 1, 2, \dots, J-1, t = 1, \dots, T \quad (27)$$

其中约束 (21) 表示匹配库存余材的数量限制; 约束 (22) 表示合同不能既匹配又生产, 且每个合同最多只能匹配一种余材; 约束 (23) 表示工序的产能约束, 工序在单位时间内的产量不能大于其产能; 约束 (24) 和 (25) 表示如果合同  $i$  生产时的工序时间一致性和前序关系; 约束 (26) 表示每个合同在同一时段最多只可完成两道工序; 约束 (27) 表示各工序在各时间段内的在制品库存不能超过库存限制.

### 3 求解策略

可以看出,基于MTO-MTS的合同计划模型求解策略更为复杂,基于MTO的合同计划模型求解策略可进行相应的简化,因此本文着重介绍基于MTO-MTS的合同计划模型求解策略。

合同计划问题属于大规模组合优化问题,精确算法难以在有效时间内求解,而启发式算法成为该领域中的研究热点. 粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 最早在1995年由James Kennedy和Russell Eberhart提出<sup>[16]</sup>,其基本思想是基于对鸟类群体觅食行为的研究,学者对PSO算法不断进行深入研究<sup>[17,18]</sup>并将其广泛用于求解复杂的生产计划调度问题<sup>[19,20,21]</sup>,从大量的研究成果可以看出,粒子群算法具有较强的群体多样性,操作简单易实现、全局寻优能力强. 因此,本文采用带惯性权值的粒子群算法作为模型的求解策略,进化方程为

$$V_r^{s+1} = \omega(s) V_r^s + c_1 r_1^s (P_r^s - X_r^s) + c_2 r_2^s (P_g^s - X_r^s) \tag{28}$$

$$X_r^{s+1} = X_r^s + V_r^{s+1} \tag{29}$$

其中  $r = 1, 2, \dots, R$ ,  $R$  代表颗粒群的规模,  $s$  为迭代的次数,  $\omega(s)$  为第  $s$  次迭代的惯性系数,  $r_1^s$  和  $r_2^s$  为  $[0, 1]$  区间均匀分布的随机数,  $c_1$  和  $c_2$  为加速常数. 惯性权值采用线性递减惯性权重, 线性衰减公式为

$$\omega(s) = 0.9 - \frac{s}{MaxStep} \times 0.5 \tag{30}$$

#### 3.1 编码方案

本文采用分段自然数编码方案,即  $L_r = [c_{r1}, c_{r2}, \dots, c_{rN}, p_{r11}, p_{r12}, \dots, p_{r1J}, \dots, p_{rN1}, \dots, p_{rNJ}]$ , 其中向量  $L_r$  代表第  $r$  个粒子的值,前半段  $[c_{r1}, c_{r2}, \dots, c_{rN}]$  为库存匹配段,其中  $c_{ri}$  ( $0 \leq r \leq R, 1 \leq i \leq N$ ) 代表合同  $i$  和第  $c_{ri}$  种余材匹配,如果  $c_{ri} = 0$ ,即合同  $i$  不匹配;后半段  $[p_{r11}, p_{r12}, \dots, p_{r1J}, \dots, p_{rN1}, \dots, p_{rNJ}]$  为生产时间段,  $p_{rij}$  ( $1 \leq j \leq J$ ) 代表第  $i$  个合同在第  $j$  道工序的生产时间,如果  $p_{rij} = 0$ ,表明合同  $i$  不在工序  $j$  生产。

#### 3.2 初始解生成

由于合同不能既匹配又完全生产,先进行生产安排,再进行库存匹配。

对于成品合同  $i$ ,首先在  $[-T, T]$  之间随机产生一个整数,如果产生的值在  $[-T, 0]$  之间,则令  $p_{ri1} = 0$ ,同时令  $p_{ri2} = 0, \dots, p_{riJ} = 0$ ;如果产生的值大于0,将该值赋给  $p_{ri1}$ ,然后在  $[p_{ri1}, T]$  之间随机产生一个整数作为  $p_{ri2}$  的值,依次类推,直到产生  $p_{riJ}$  的值.对于半成品合同  $i$ ,采用同样方法,直到产生  $p_{riJ}$  的值,而令  $[p_{ri(J+1)}, p_{ri(J+2)}, \dots, p_{riJ}]$  各项均为0。

进行库存匹配时,若合同  $i$  生产,则令  $c_{ri} = 0$ ;若合同  $i$  不生产,则在  $[1, K]$  之间产生一个随机整数作为  $c_{ri}$  的值,表示第  $i$  个合同和第  $c_{ri}$  种余材匹配.若合同  $i$  是成品合同,还必须产生  $p_{ri(J+1)}$  至  $p_{riJ}$  的值。

如某合同未安排生产且未获得库存匹配,则该合同为取消合同。

#### 3.3 非可行解的修复

位置越界:判断编码中是否有超出取值范围的值.如果粒子库存匹配段编码中  $c_{ri}$  小于合同所要求的钢级,则令  $c_{ri} = 0$ ;如果  $c_{ri} > K$ ,则令  $c_{ri} = K$ .如果小段  $[p_{ri1}, p_{ri2}, \dots, p_{riJ}]$  中有较多的值小于0,则令该段中所有值等于0;如果仅有少量的值小于0,将小于0的值随机转化为  $[1, T]$  内的值;如果  $p_{rij} > T$ ,令  $p_{rij} = T$ .但是如果合同  $i$  为半成品合同,仅限于考虑  $[p_{ri1}, p_{ri2}, \dots, p_{riJ}]$ 。

若合同  $i$  既匹配又完全生产,计算每种库存余材的剩余可用量  $\Delta Q_k = Q_k - Q'_k$ ,其中  $Q'_k$  代表余材  $k$  被匹配的量,当  $\Delta Q_k \geq h_{ik}$  时,合同  $i$  选择匹配,否则选择完全生产。

工序前序关系:若合同  $i$  不满足前后工序顺序约束,则再随机生成满足前后工序约束的解。

库存余材量约束:计算每种库存余材的剩余可用量  $\Delta Q_k = Q_k - Q'_k$ ,如果  $\Delta Q_k$  小于0,则随机取消合同  $i$  和余材  $k$  的匹配,直到满足库存约束为止。

超出生产能力限制:计算剩余产能  $\Delta E_j = E_{jt} - E'_j$ ,其中  $E'_j$  代表工序  $j$  在时间  $t$  内的实际生产量,如果  $\Delta E_j$  小于0,则在保证前后工序约束和产能约束的情况下,将工序  $j$  在时间  $t$  内生产的某个

合同在该工序的生产时间进行调整. 如无法调整, 则将该合同的生产计划取消.

超出在制品库存约束: 判断在制品库存约束是否满足. 如果不满足, 则在满足其它约束的情况下随机改变某合同在该工序的生产时间, 否则取消该合同的生产, 直到满足约束.

对于既未匹配又未生产的合同, 尽量选择库存匹配和生产, 如无法满足约束, 则取消合同生产.

### 3.4 算法流程

初始化. 初始惯性系数  $w_0 = 0.9$ 、加速常数  $c_1$  和  $c_2$ 、最大迭代次数  $MaxStep$ 、粒子数  $R$  等参数.

随机生成  $R$  个初始可行粒子, 并进行非可行解修复.

计算目标函数值, 并将每个粒子的当前解作为个体最好解, 将种群中最好的个体解作为全局最好解.

For  $s = 1$  to  $MaxStep$

For  $r = 1$  to  $R$

利用式 (28)、(29) 进行粒子移动和速度更新;

对非可行解进行修复;

End For

计算目标函数值, 并更新个体  $r$  的历史最好解  $P_r$  和全局最好解  $P_g$ ;

$n++$  (迭代次数统计);

根据式 (30) 更新惯性系数;

End For

结束. 输出  $P_g$  等实验结果.

## 4 实验结果及分析

本文以某著名钢厂的合同数据为例进行实验, 假设主要工序包括炼钢—连铸、热轧、冷轧三道工序, 原材料经过炼钢—连铸工序后成为板坯, 板坯即为半成品. 产品共有 10 种钢级, 各钢级分为 2 种不同规格产品. 两种管理模式下生产负荷和库存总量都相同, 有委托成品合同一致, 预测合同中钢级一致, MTO-MTS 模式下板坯库存量等于

MTO 模式下相同钢级的两种规格成品库存之和. 成品预测偏差  $\varphi$  分为 0%、12%、24% 和 36% 四种情况.

算法采用 VC++ .NET 2003 编程, 运行在 XP 系统下的 Intel Core Duo CPU 1.66GHz (2G 内存) Laptop 机上. 基本参数:  $T = 10$  (以半月为一个时间单位)  $\alpha = 20$   $\gamma = 5$   $\xi = 25$   $\rho = 0.5$   $g_{kk'} = 5$   $\lambda_s = \lambda_g = 2$ .

### 4.1 算法参数的确定

初始惯性系数  $w_0 = 0.9$ , 最大迭代次数  $MaxStep = 500$ . 首先对算法的参数进行测试, 令加速常数分别取  $c_1 = 0.5, 1.5, 2.0, 2.5, 3.5$ , ( $c_1 + c_2 = 4$ ); 而粒子群的规模分别取  $R = 10, 20, 30, 40$ , 共  $5 \times 4 = 20$  组测试来寻找模型优化的参数配置, 对每组数据分别测试 10 次, 统计平均目标值, 结果如图 2 所示.

由图 2, 当加速常数  $c_1 = 2$   $c_2 = 2$ , 粒子群规模取  $R = 40$  时, 算法求解结果理想且比较稳定, 表明在该参数设置下算法的总体寻优能力较强. 虽然  $R = 50$  时, 可能获得更好的结果, 但最优解无较大改善, 而且结果不够稳定. 从求解效果和时间效率两方面考虑, 取参数值  $c_1 = 2$   $c_2 = 2$   $R = 40$ .

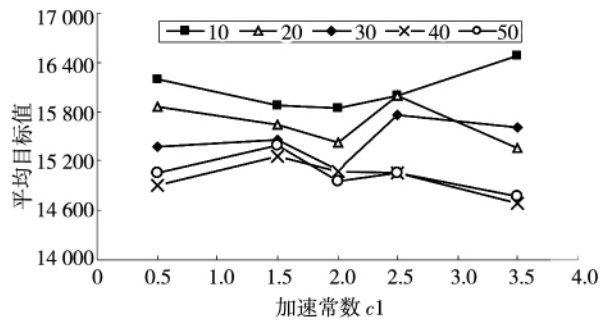


图 2 不同参数下的平均目标值

Fig.2 Average objective value vs different parameters

### 4.2 模型的求解结果

令 PSO 算法的粒子数  $R = 40$ , 最大迭代次数  $MaxStep = 500$ . 采用 PSO 算法对三组合同数据 ( $N = 75, 125, 172$ ) 进行了求解, 结果如表 1 所示.

从表 2 可以看出, 对于不同规模的合同数据, MTO 在预测偏差为 0 的情况下, 结果均优于 MTO-MTS. 而当预测偏差增长到一定程度时,

MTO-MTS 明显优于 MTO 模式. 合同规模为 172 时, 目标值增长趋势最明显, 预测偏差为 0 时, 平均目标值为 47 194, 而预测偏差为 36% 时, 平均目标值为 65 902, 明显大于 MTO-MTS 模式下平均目标值 59 234. 说明当对市场需求的预测有较大

偏差时, MTO 管理模式将不再适用于钢铁企业.

### 4.3 成本因素分析

为了便于对实验结果进行深度分析, 各组合同数据结果中各项惩罚值如表 2、表 3 和表 4 所示.

表 1 三组合同数据的实验结果

Table 1 Computational results of three instances

合同规模	生产模式	最好目标值 BF	平均目标值 AF	最差目标值 WF	运行时间( s)	平均收敛代数
75	MTO-MTS	14 218	16 140	17 428	58	293
	MTO 0	13 249	15 078	16 059	124	222
	MTO 12	15 011	17 378	18 605	143	211
	MTO 24	17 542	19 742	22 023	149	308
	MTO 36	18 162	19 566	21 093	153	272
125	MTO-MTS	34 114	37 057	39 835	104	223
	MTO 0	31 052	33 472	35 515	213	223
	MTO 12	30 491	34 298	37 818	216	298
	MTO 24	33 384	34 957	36 814	234	225
	MTO 36	36 558	40 257	42 285	256	267
172	MTO-MTS	57 592	59 234	61 442	146	237
	MTO 0	44 919	47 194	49 907	275	198
	MTO 12	47 892	49 863	51 862	283	221
	MTO 24	51 032	54 100	56 382	295	260
	MTO 36	63 154	65 902	67 440	345	206

表 2 75 个合同时各项惩罚值

Table 2 Penalty values when  $N = 75$

模式	结果项目	目标值	库存成本	提前和拖期	合同取消	匹配	闲置能力
MTO-MTS	最好值	14 218	3 100	9 225	650	225	1 018
	平均值	16 140	2 990	10 791	1 053	267	1 039
	最差值	17 428	3 000	12 605	550	215	1 058
MTO 0	最好值	13 249	3 060	5 350	3 775	130	934
	平均值	15 078	3 076	6 837	4 068	167	930
	最差值	16 059	2 940	7 850	4 225	130	914
MTO 12	最好值	15 011	3 840	6 270	3 650	215	1 036
	平均值	17 378	3 610	7 209	5 415	201	943
	最差值	18 605	3 580	7 575	6 425	130	895
MTO 24	最好值	17 542	3 850	7 955	4 700	75	962
	平均值	19 742	3 728	8 594	6 288	211	921
	最差值	22 023	3 680	11 580	5 725	80	958
MTO 36	最好值	18 162	3 230	7 760	5 700	585	887
	平均值	19 566	3 407	9 485	5 285	451	938
	最差值	21 093	3 330	11 285	5 075	475	928



表 3 125 个合同时各项惩罚值  
Table 3 Penalty values when  $N = 125$

模式	结果项目	目标值	库存成本	提前和拖期	合同取消	匹配	闲置能力
MTO-MTS	最好值	34 114	5 120	22 355	3 600	1 405	1 634
	平均值	37 057	5 156	25 566	3 788	900	1 647
	最差值	39 835	5 090	28 605	3 850	650	1 640
MTO 0	最好值	31 052	5 350	16 225	7 225	680	1 572
	平均值	33 472	5 352	16 539	9 638	484	1 459
	最差值	35 515	5 470	20 460	7 450	600	1 535
MTO 12	最好值	30 491	5 370	13 300	9 550	825	1 446
	平均值	34 298	5 503	17 396	9 383	530	1 486
	最差值	37 818	5 380	20 415	9 975	600	1 448
MTO 24	最好值	33 384	5 650	16 460	9 125	685	1 464
	平均值	34 957	5 728	17 144	9 963	629	1 493
	最差值	36 814	5 870	15 935	12 975	635	1 399
MTO 36	最好值	36 558	5 810	16 955	11 325	985	1 483
	平均值	40 257	5 972	20 638	11 180	1 004	1 463
	最差值	42 285	6 270	20 430	13 175	1 045	1 365

表 4 172 个合同时各项惩罚值  
Table 4 Penalty values when  $N = 172$

模式	结果项目	目标值	库存成本	提前和拖期	合同取消	匹配	闲置能力
MTO-MTS	最好值	57 592	8 180	40 665	3 850	2 395	2 502
	平均值	59 234	8 149	41 783	5 165	1 687	2 450
	最差值	61 442	8 030	42 310	7 600	1 185	2 317
MTO 0	最好值	44 919	8 250	19 910	13 675	975	2 109
	平均值	47 194	8 230	22 601	13 438	778	2 147
	最差值	49 907	8 240	24 795	14 400	415	2 057
MTO 12	最好值	47 892	8 760	21 520	14 775	705	2 132
	平均值	49 863	8 460	22 715	15 718	906	2 064
	最差值	51 862	8 500	24 445	15 800	985	2 132
MTO 24	最好值	51 032	8 670	22 025	17 200	1 115	2 022
	平均值	54 100	8 831	25 425	16 968	835	2 041
	最差值	56 382	8 860	29 740	14 600	1 095	2 087
MTO 36	最好值	63 154	9 070	33 740	17 275	970	2 099
	平均值	65 902	9 255	34 776	18 908	968	1 995
	最差值	67 440	9 170	35 070	20 125	1 120	1 955

当预测完全符合市场需求时,当然 MTO 管理模式优于 MTO-MTS 混合管理模式. 两者库存成本相差不大,由于成品匹配后可以直接交货,能及时满足客户需求,因此总惩罚小于 MTO-MTS 模式. 但是,随着市场竞争日益激烈,钢铁行业也不可避免地面对波动的市场需求,预测偏差也将随之增大.

在 MTO-MTS 管理模式,合同提前 / 拖期惩罚值和匹配惩罚值相对较高,但合同取消惩罚值较低. 因为混合管理模式,半成品匹配后还需要

进行进一步加工才能交货,易导致拖期;但是,由于库存能更多地匹配合同需求,即使以优充次导致匹配惩罚值增加,但却减少了合同取消的可能性.

当预测偏差增大时, MTO 管理模式下库存成本呈增长趋势,这是由于产品规格预测偏差较大,产品不能匹配,导致库存成本增加. 但在混合管理模式,由于一种半成品适用于多种规格的产品,产品规格预测不准确导致成品无法匹配,而半成

品匹配可能仍可成功匹配,从而降低库存成本.所以,混合管理模式可以规避产品预测不准确而导致的库存风险.

MTO 管理模式下提前/拖期惩罚值与合同取消惩罚值也随着预测偏差增大呈上升趋势,成品库存不能成功匹配,导致更多的生产,生产负荷加重,必然导致更多合同不能按时完工.

综上所述,可以看出当预测偏差较小时,MTO 管理模式优于混合管理模式.随着预测准确度下降,MTO 管理模式库存成本、提前和拖期惩罚以及取消惩罚均逐渐增大,也就逐渐失去了其优越性.在实际生产中,产品规格更多,预测难度更大,更容易导致成品匹配的不成功,MTO-MTS 混合管理模式的优势将愈明显.要注意的是,本文中讨论的预测偏差的前提条件与传统理解不同,文中的预测是考虑有少量优质客户的订单暂时未到,但认为在生产完毕之前即可接到这些订单,生产完毕立即就可交货,因此其目的并非生产库存,而是将无委托合同与已接受的客户订单同等对待,视同 MTO 生产.但随着市场的发

展,这部分预测的准确率不可避免会出现越来越大的误差,那么按 MTO 生产就不再是最优模式.因此,本文的研究结果与企业—市场未来的发展方向是相适应的.

## 5 结束语

本文基于钢铁企业生产计划组织流程,分析钢铁市场需求特点和钢铁企业生产工艺流程,比较 MTO 和 MTO-MTS 生产管理模式,提出将 MTO-MTS 混合管理模式应用于钢铁企业合同计划.为了验证混合管理模式的优越性,分别建立了基于 MTO 管理模式和 MTO-MTS 混合管理模式的合同计划混合整数规划模型,同时考虑库存余材匹配和生产计划,并设计了 PSO 算法求解策略.通过仿真实验来比较两种模式下所编制合同计划的效果,实验结果表明 MTO-MTS 管理模式能够规避对需求预测不准确的风险,可以协调快速交货和降低库存的矛盾,更能适应客户需求多品种、小批量的发展趋势.

## 参 考 文 献:

- [1]张 涛,王梦光,唐立新. 基于 MTO 管理系统的钢厂合同计划方法[J]. 控制与决策,2000,15(6): 650-655.  
Zhang Tao, Wang Mengguang, Tang Lixin. The method for the order planning of the steel plant in the MTO management system[J]. Control and Decision, 2000, 15(6): 650-655. (in Chinese)
- [2]Liu Shixin, Tang Jiafu, Song Jianhai. Order-planning model and algorithm for manufacturing steel sheets[J]. International Journal of Production Economics, 2006, 100: 30-43.
- [3]罗治洪,唐立新. 炼钢热轧一体化生产与物流计划模型及求解[J]. 管理科学学报,2011,14(6): 16-23.  
Luo Zhihong, Tang Lixin. Modeling and solution to integrated production and logistics planning of steel making and hot rolling[J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(6): 16-23. (in Chinese)
- [4]Ivo J B F Adan, Jan van der Wal. Combining make to order and make to stock[J]. OR Spektrum, 1998, 20: 73-81.
- [5]Tsubone H, Ishikawa Y, Yamamoto H. Production planning system for a combination of make-to-stock and make-to-order products[J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(18): 4835-4851.
- [6]Soman C A, van Donk D P, Gaalman G J C. Capacitated planning and scheduling for combined make-to-order and make-to-stock production in the food industry: An illustrative case study[J]. Int. J. Production Economics, 2007, 108: 191-199.
- [7]Soman C A, van Donk D P, Gaalman G. Comparison of dynamic scheduling policies for hybrid make-to-order and make-to-stock production systems with stochastic demand[J]. Int. J. Production Economics, 2006, 104: 441-453.
- [8]Sun X Y, Ji P, Sun L Y, et al. Positioning multiple decoupling points in a supply network[J]. Int. J. Production Economics, 2008, 113: 943-956.
- [9]Chang K, Lu Y. Queueing analysis on a single-station make-to-stock/make-to-order inventory-production system[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34: 978-991.
- [10]Kalagnanam J R, Dawande M W, Trumbo M, et al. Surplus inventory matching problems in the process Industry[J]. Operations Research, 2000, 48(4): 505-516.
- [11]胡琨元,常春光,郑秉霖. 钢铁企业中库存匹配与生产计划联合优化模型与算法[J]. 信息与控制,2004,33(2): 177-180.  
Hu Kunyuan, Chang Chunguang, Zheng Binglin. The model and algorithm for joint optimization of inventory matching and production planning in steel plant[J]. Information and Control, 2004, 33(2): 177-180. (in Chinese)

- [12]Zhang T ,Zhang Y J ,Zheng Q P , et al. A hybrid particle swarm optimization and tabu search algorithm for order planning problems of steel factory based on the make-to-stock and make-to-order management architecture [J]. *Journal of Industrial and Management Optimization* ,2011 ,7( 1) : 31 – 51.
- [13]Meredith J ,Akinc U. Characterizing and structuring a new make-to-forecast production strategy [J]. *Journal of Operation Management* ,2007 ,25( 3) : 623 – 642.
- [14]Denton B ,Gupta D ,Jawahir K. Managing increasing product variety at integrated steel mills [J]. *Interfaces* ,2003 ,33( 2) : 41 – 53.
- [15]Denton B ,Gupta D. Strategic inventory deployment in the steel industry [J]. *IIE Transactions* ,2004 ,36: 1083 – 1097.
- [16]Kennedy J ,Eberhart R C. Particle Swarm Optimization [C]. *Proceeding of the IEEE Intl. Conference on Neural Networks* , IV. Piscataway ,NJ: IEEE Service Center ,1995 ,1942 – 1948.
- [17]刘勇,马良. 元胞微粒群算法及其在多维背包问题中的应用 [J]. *管理科学学报* ,2011 ,14( 1) : 86 – 95.  
Liu Yong ,Ma Liang. Cellular particle swarm optimization algorithm and its application to multidimensional knapsack problem [J]. *Journal of Management Sciences in China* ,2011 ,14( 1) : 86 – 95. ( in Chinese)
- [18]刘黎黎,汪定伟. 复合粒子群算法及其在动态环境中的应用 [J]. *系统工程学报* ,2011 ,26( 2) : 169 – 274.  
Liu Lili ,Wang Dingwei. Composite particle swarm optimization algorithm and its application in dynamic environments [J]. *Journal of Systems Engineering* ,2011 ,26( 2) : 169 – 274. ( in Chinese)
- [19]韩毅,唐加福,牟立峰,等. 粒子群算法求解无能力约束生产批量计划问题 [J]. *管理科学学报* ,2008 ,11( 5) : 33 – 40.  
Han Yi ,Tang Jiafu ,Mu Lifeng , et al. Particle swarm optimization algorithm for solving uncapacitated multilevel lot-sizing problems [J]. *Journal of Management Sciences in China* ,2008 ,11( 5) : 33 – 40. ( in Chinese)
- [20]Pan Q K ,Tasgetiren M F ,Liang Y C. A discrete particle swarm optimization algorithm for the no-wait flowshop scheduling problem [J]. *Computers and Operations Research* ,2008 ,35( 9) : 2807 – 2839.
- [21]宋继伟,唐加福. 基于离散粒子群优化的轧辊热处理调度方法 [J]. *管理科学学报* ,2010 ,13( 6) : 44 – 53.  
Song Jiwei ,Tang Jiafu. Roller annealing scheduling method based on discrete particle swarm optimization [J]. *Journal of Management Sciences in China* ,2010 ,13( 6) : 44 – 53. ( in Chinese)

## Make to order/make to stock management mode on the order planning problem of steel-iron factories

ZHANG Tao<sup>1</sup> , CHEN Qi<sup>1</sup> , HUANG Ying-lei<sup>2</sup> , ZHANG Yue-jie<sup>3</sup> , WANG Ding-wei<sup>4</sup>

1. School of Information Management and Engineering , Shanghai University of Finance and Economics , Shanghai 200433 , China;

2. Shanghai Baosight Software Limited Company , Shanghai 200040 , China;

3. School of Computer Science , Fudan University , Shanghai 200433 , China;

4. Information College , Northeastern University , Shenyang 110004 , China

**Abstract:** Based on the production organization processes of steel-iron factories , this paper proposes a hybrid MTO-MTS order planning management method , and establishes integer programming models for the order planning problems based on MTO management idea and MTO-MTS management idea respectively. The models take into account earliness/tardiness penalty , inventory cost , production cost , inventory matching cost and order cancellation penalty , and consider inventory matching and production planning simultaneously. In order to solve the models , a PSO algorithm with heuristic repaired strategy for infeasible solutions is designed. In the experiments , parameters are analyzed and three sets of data with different order quantities are tested. Numerical results show that the MTO-MTS management mode can avoid the risk of demand forecasting inaccuracy , coordinate the contradiction of fast delivery and low inventory , and adapt to the development trend of the diversification and individualization of market demand.

**Key words:** make to order ( MTO) ; make to stock ( MTS) ; order planning; inventory matching; particle swarm optimization ( PSO)