

# 基于 MTO 管理系统的钢厂合同计划方法\*

张 涛 王梦光 唐立新 宋健海 杨建夏  
(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110006) (上海宝钢计算机公司)

**摘 要** 构造了钢铁企业的 MTO 管理系统,建立了钢铁企业合同计划编制的整数规划模型,并提出用基于可重复自然数编码和三变异算子的遗传算法对模型进行求解。以热轧厂合同计划编制为例进行实验,结果表明模型符合生产实际,获得的结果优于人机交互系统,求解算法是有效的。

**关键词** MTO, 合同计划, 整数规划, 遗传算法, 三变异算子

**分类号** O 223

## The Method for the Order Planning of the Steel Plant Based on the MTO Management System

Zhang Tao, Wang Mengguang, Tang Lixin Song Jianhai, Yang Jianxia  
(Northeastern University) (Company of Computer, Baogang)

**Abstract** A MTO management system for the steel-iron enterprises is founded. An integer-programming model for the order planning of the steel-iron enterprises is created. The genetic algorithm based on repeatable natural scale code and 3-mutation operator is presented to solve the model. For testing the model and algorithm, the order planning of the hot-milling plant was handled. The numerical analysis shows that the model comes up to the production process. The solutions obtained by above algorithm are superior to those obtained by the human-machine system.

**Key words** make-to-order (MTO), order planning, integer-programming, genetic algorithm, 3-mutation operator

## 1 引 言

目前国际上关于 MTO 的研究基本都是针对机械制造业进行的,对于每项合同,从与客户谈判到交货,需经过投标、接受合同、合同生产和交货几个阶段。许多学者对此问题进行了研究<sup>[1,2]</sup>。

现代化钢铁企业的发展趋势是快速适应市场环境,以及生产过程的连续化和自动化。钢铁产品竞争的焦点在于:产品质优价廉,准时交货,多品种小批量。因此要求:1) 在市场环境中合理快速地提出投标(条款),以便占领更大的市场;2) 对生产过程进行综合管理,使物流和信息流尽可能同步,提高设备

的生产效率,降低成本,提高产品竞争力;3) 使尽可能多的合同能够按时交货,赢得企业的信誉并获得预期的利益。

本文研究钢铁企业的 MTO 管理系统,并对其中的合同计划层进行了深入研究。主要内容包括:1) 提出钢铁企业的 MTO 管理系统;2) 建立合同计划编制的整数规划模型;3) 提出基于可重复自然数编码和三变异算子的遗传算法对模型求解;4) 通过实验验证模型和算法的有效性。

## 2 钢铁企业的 MTO 管理系统

目前,还未见有关钢铁企业 MTO 的文献报导。

\* 国家自然科学基金项目(79700006)和国家 863 计划项目(863-511-709)

1999-09-01 收稿,1999-10-28 修回

开发钢铁业 MTO 管理系统可借鉴机械制造业的成熟理论与方法, 但因其自身的生产工艺和生产管理等特点, 决定了不能照搬机械制造业 MTO 管理系统的理论和方法。

钢铁企业生产管理的目的是使各工序之间协调一致, 保证物流、时间节奏一贯制, 提高设备利用率和成材率, 并保证准时交货。管理系统需要把企业从订货、生产准备、生产管理直到交货的各项活动有机地结合起来, 因此本文提出一种 MTO 管理系统的分层递阶体系。

在建立钢铁企业 MTO 管理系统的过程中, 首先要求保证企业生产所需的资金和资源, 建立确定产品周期的原则和产品标准, 确定最优产品组合。这便是构造第 1 层, 即长期计划层。

为将钢铁企业的生产与市场紧密结合起来, 需构造第 2 层, 即客户合同计划层, 作为年计划(分季)。本层获得下层报告的生产信息, 并结合市场信息, 快速精确地提出将投标的合同的交货周期和价格。

对于钢铁企业而言, 生产能力由设备能力决定, 只能通过生产计划和调度来提高设备的利用率, 而不能绝对地提高车间的生产能力, 因此其生产能力的约束更强。为此构造系统第 3 层, 即负荷平衡计划层, 作为季计划(分月), 根据目前的机组能力、未完工的合同信息以及机组的检修维护等信息, 预测机组的可用能力。

第 4 层为合同计划层。根据负荷平衡计划层传来的信息, 按一定的规则把需生产的合同分配给各工序(时间、数量、质量)。这是本文研究的重点问题。

第 5 层为日生产调度层。根据合同计划层下发的任务, 每天对各车间需生产的产品进行排序, 使产品生产顺序最优, 以便最大限度地发挥机器的生产能力, 提高生产效率, 并满足客户提出的要求。

### 3 合同计划的数学模型

#### 3.1 合同计划层的必要性

当今钢铁工业的主要特点是既要各种条件下保证生产的连续性, 又要满足用户对产品质量和按时供货的要求。如何尽量满足客户对钢材质量和数量的需求, 并及时把货物交给客户, 成为钢厂产销集成化的重要目标。在致力达到此目标的过程中, 合同计划是各层次生产计划中贯穿各个生产工序的决定生产能否顺利完成的重要环节。

在市场经济环境下, 合同计划是体现以销定产的生产计划, 其主要任务是根据合同的交货期、各生产工序上机组的生产能力等来安排合同的生产周期。某一合同被编入合同计划后, 从事日生产计划编制的工作人员便可按照合同计划所确定的时间, 依次编制各生产工序上日和班的作业计划。

#### 3.2 合同计划问题描述

在钢材生产中, 每份合同连续通过的生产路径(大工序)是确定的, 即炼钢、轧制、精整等。一般情况下, 对同一品种规格的产品, 除轧制工序仅有一套机组外, 炼钢和精整等工序都有多台机组并行工作可供选择, 即合同计划的任务是确定每项合同在某时间段通过某工序的某台机组。本文基于这一考虑来建立其数学模型。

合同计划的编制可概述为: 假设有  $N$  项合同、 $M$  道工序, 每项合同的数量、交货期及其生产路径(通过的工序和在每道工序可使用的机器, 不唯一)已知, 所有合同通过的工序相同, 每台机器的能力一定。合同计划是在满足能力约束和前序关系的前提下, 安排每项合同在每道工序通过的机器和通过的时间, 使所有合同的提前和拖期总惩罚最小。

#### 3.3 数学模型

如果对每种产品只考虑大工序, 其加工路径确定, 这是一般的 Flow Shop(FS)问题; 如果考虑某些品种在某工序有并行机可供选择时, 则是 Flexible Flow Shop(FFS)问题, 它是一般 FS 问题的推广<sup>[3]</sup>。本文的合同计划问题是一类 FFS 问题, 不同的只是合同计划只对合同安排其加工的时间段, 而不对该时间段内的合同予以排序。

为使钢厂能在不久的将来适应国际大市场的竞争(发达国家钢厂的交货期以旬或周为时间单位), 本模型中合同的交货期和生产时间段以半旬为单位。对于每项合同, 在每道工序中都有对可用机器的限制范围。模型的目标函数为所有合同的提前和拖期总惩罚最小。

对于各工序, 假设:

- 1) 每道工序中每台机器的每半旬总能力已知;
- 2) 每道工序各台机器相同, 但某合同对于不同机器其虚拟生产量可不同, 从而表示机器的不同性;
- 3) 各合同在各工序的通过时间(从进入一工序到本工序完成的时间)小于一个半旬, 同一合同的多道工序可在同一半旬中完成;
- 4) 不单独考虑中间库存。

为便于表示, 定义以下数学符号:

$N$  —— 合同总数;  
 $M$  —— 工序数;  
 $T$  —— 计划周期;  
 $[d_i - u_i, d_i + v_i]$  —— 交货期窗口(以半旬为单位, 已知);  
 $t_{ij}$  —— 合同  $i$  在工序  $j$  的开工时间(半旬);  
 $e_i$  —— 合同  $i$  的实际合同量(已知);  
 $e_{ijk}$  —— 合同  $i$  在工序  $j$  的机器  $k$  上的虚拟生产量(已知);  
 $C_i$  —— 合同  $i$  的完工时间, 即最后一道工序的通过时间(半旬);  
 $E_{jht}$  —— 工序  $j$  的机器  $k$  在  $t$  半旬的总能力(已知);

$$x_{ijkt} = \begin{cases} 1, & \text{合同 } i \text{ 在半旬 } t \text{ 内在工序 } j \text{ 的} \\ & \text{机器 } k \text{ 上加工} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

其中,  $x_{ijkt}$  为决策变量;  $i(i = 1, 2, \dots, N)$  表示合同号,  $j(j = 1, 2, \dots, M)$  表示工序号,  $k(k = 1, 2, \dots, M_j)$  表示工序  $j$  中的机器号,  $t(t = 1, 2, \dots, T)$  表示时间段。

建立数学模型如下

$$\min \sum_{i=1}^N e_i (\alpha \max\{0, d_i - u_i - c_i\} + \beta \max\{0, c_i - d_i - v_i\}) \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{M_j} X_{ijkt} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N (X_{ijkt} * e_{ijk}) \leq E_{jht}, j = 1, 2, \dots, M \quad k = 1, 2, \dots, M_j, t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

$$t_{i,j-1} \leq t_{ij}, i = 1, 2, \dots, N \quad j = 2, 3, \dots, M \quad (4)$$

$$x_{ijkt} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, M, k = 1, 2, \dots, M_j \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

其中,  $\alpha$  是合同  $i$  的提前惩罚系数,  $\beta$  是合同  $i$  的拖期惩罚系数。目标(1)是最小化所有合同的提前-拖期总惩罚值; 约束(2)保证每项合同必须通过每一工序, 在每一工序必须且仅能在一台机器上加工; 约束(3)保证每半旬某机器所加工合同量总和不得超过此机器的总加工能力(能力约束); 约束(4)表示合同  $i$  在工序  $j$  的开工时间(半旬)不小于在工序  $j-1$  的开工时间; 式(5)表示决策变量的取值范

围。

## 4 合同计划的算法

### 4.1 遗传算法的设计

从模型可看出, 该合同计划模型是一个非线性 0-1 整数规划模型。由于变量维数较多, 目标函数的非线性增加了计算的复杂性。已经证明, FFS 即使在只有两个阶段且其中一个阶段具有并行机, 目标函数是最小最大完工时间的最简单情况, 也是 NP-难问题<sup>[4]</sup>。本文问题较复杂, 解的搜索空间较大, 用精确算法在可行时间内难以求解<sup>[5]</sup>。遗传算法已广泛用于各种组合优化问题<sup>[6]</sup>, 虽然它不能使搜索空间减小, 但由于群体搜索的并行性使它可在较短时间内搜索较大的空间, 因此本文决定采用遗传算法。

#### 4.1.1 染色体编码设计

本文采用可重复自然数编码, 设计染色体的基因  $\alpha_{ijk}$  为  $A = \{\alpha_{ijk}\}$ 。这里,  $\alpha_{ijk}$  表示合同  $i$  在工序  $j$  的机器  $k$  的通过时间段,  $i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M, k = 1, 2, \dots, M_j$ 。

称  $\{\alpha_{i11}, \alpha_{i12}, \dots, \alpha_{i1M_1}, \dots, \alpha_{iM2}, \dots, \alpha_{iMM_M}\}$  为大段, 称大段中的  $\{\alpha_{ij1}, \alpha_{ij2}, \dots, \alpha_{ijM_j}\}$  为小段。每一小段内只有一个基因不为 0(基因值为 0 表示此合同不在此机器上加工), 这种编码方式保证了约束(2)的可行性。不为 0 基因的数值取一时间值(合同  $i$  经工序  $j$  的机器  $k$  的时间段), 同一大段内其取值范围为  $1 \sim (T + t_d)$  ( $t_d$  是一个辅助计算的整数)的自然数, 且各小段(不为 0 的基因值)之间必须满足约束(4); 不同大段之间其数值可以重复。完工半旬  $C_i$  就是相应第  $i$  大段的第  $M$  小段中不为 0 的值。

#### 4.1.2 初始种群

根据上述染色体编码的要求, 采用随机方式产生初始种群  $L$  个染色体。

#### 4.1.3 复制策略的确定

设对于种群中第  $l$  个染色体有目标函数

$$F_l = \sum_{i=1}^N e_i (\alpha \max\{0, d_i - u_i - c_i\} + \beta \max\{0, c_i - d_i - v_i\}) \quad (6)$$

为了限制不满足约束(3)的染色体在新一代种群中的比例, 特设计用于复制的选择函数。定义每条染色体对约束(3)的可行距离  $ID_l$  为

$$ID_l = \max_{j=1}^M \max_{k=1}^{M_j} \max_{t=1}^T \left\{ \left[ \sum_{i=1}^N X_{ijkt} e_{ijk} - E_{jht} \right], 0 \right\}$$

用以表征染色体  $l$  的非可行程度, 则用于复制的选择函数  $f_l$  为

$$f_l = C - F_l - \gamma D_l \quad (8)$$

其中令

$$C = \max_Q \left\{ F_l + \gamma \prod_{j=1}^M \prod_{k=1}^{M_j} \prod_{t=1}^T \max \times \left\{ \left\{ \prod_{i=1}^N X_{ijkl} e_{ijk} - E_{jkt} \right\}, 0 \right\} \right\} + \lambda \quad (9)$$

$Q = \{1, 2, \dots, L\}$  为种群集合,  $L$  为种群规模,  $\gamma$  为约束(3)的不可行惩罚系数,  $\lambda$  为适当的正整数。

本算法采用滚轮盘的方式进行复制, 复制的选择概率由下式获得。

$$P_l = f_l \prod_{a=1}^L f_a, \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (10)$$

可以看出, 如果  $C$  值仅设为一个较大的常数, 当各染色体目标函数值不太大, 而它们的值相差很大时, 得到的  $f_l$  值便掩盖了各染色体的质量差别。因此本算法在复制时,  $C$  值设置为式(9)产生的变量。

#### 4.1.4 交叉算子

按交叉概率  $P_c$  进行“二点交叉”(TPC), 即把两个染色体  $a$  和  $b$  在两个随机位置间的所有大段进行交换, 相应小段只交换不为 0 的值, 而原不为 0 的位置不变。由于交叉操作以大段为单位在对应小段之间进行, 因此染色体始终保证满足约束(2)和(4)。

#### 4.1.5 变异算子

由于每条染色体中存在大段和小段, 则用普通的变异算子不能完成计算过程。为了保证搜索的全局性和满足约束(2)和(4)的可行性, 现采用三变异算子构成一次变异操作, 对染色体中不为 0 的基因的位置及数值进行变换。变异 2 是位置变换, 设大段  $B_i = \{S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{iM}\}$ , 小段  $S_{ij} = \{a_{ij1}, a_{ij2}, \dots, a_{ijM_j}\}$ , 根据变异算子  $P_{m2}$ , 在某染色体的每个  $S_{ij}$  内的基因间进行 2 交换变异。变异 1 和变异 3 是数值变换, 变异 1 以大段为单位, 根据变异概率  $P_{m1}$ , 在  $A = \{B_1, B_2, \dots, B_N\}$  的  $B_i$  间进行 2 交换变异; 变异 3 重新随机产生元素值。在各变异中按如下适值函数

$$f_l = C - F_l - \gamma \prod_{j=1}^M \prod_{k=1}^{M_j} \prod_{t=1}^T \max \times \left\{ \left\{ \prod_{i=1}^N X_{ijkl} e_{ijk} - E_{jkt} \right\}, 0 \right\} \quad (11)$$

同时完成对变异后新染色体的择优。其中  $C$  为一足够大的常数。

## 4.2 算法特点

综上所述, 本算法对传统的遗传算法进行了某些改进, 具体表现为:

1) 采用可重复自然数编码, 满足了约束(2)和(4)的可行性。

2) 提出三变异算子, 构成一次变异操作, 有效地完成了整个变异过程。

3) 算法的整个过程始终保证约束(2)和(4)的可行性。

4) 为满足计算的需要, 把用于复制的函数和用于评价的适应函数区分开来。对于不同迭代数下的种群, 式(8)中的  $C$  为一个变量, 无论染色体如何变化, 式(8)都能体现出各染色体的质量差别, 从而保证了复制的有效进行。

5) 适应性函数设计为式(11), 同时考虑了模型的目标函数及约束(3)的可行距离。择优选择时选取目标函数和可行距离均较小的解, 并未拒绝可行距离不为 0 的解进入新一代。这是搜索的内点法和外点法的结合, 既从不可行解向可行解的方向搜索(外点法), 又从质量差的可行解向质量好的可行解搜索(内点法<sup>[7]</sup>), 因此保证了搜索的全局性。

## 5 计算结果

现以宝山钢铁公司热轧厂合同计划为例来测试本文的模型与算法。带钢的加工过程包括炼钢-精炼-连铸-热轧-精整 5 道工序。对于每项合同, 其规格的带钢通过炼钢工序后需经过何种精炼是固定的, 因此可把炼钢和精炼看作一道工序。另外, 由于工艺要求, 每种产品在经过炼钢或精炼后必须立刻进入连铸机, 如不考虑连铸机的选择, 可把炼钢-精炼-连铸抽象为一道工序。这样, 原来的 5 道工序就可简化为炼钢(+精炼+连铸)-热轧-精整 3 道工序, 其中只考虑精整工序中有并行机。

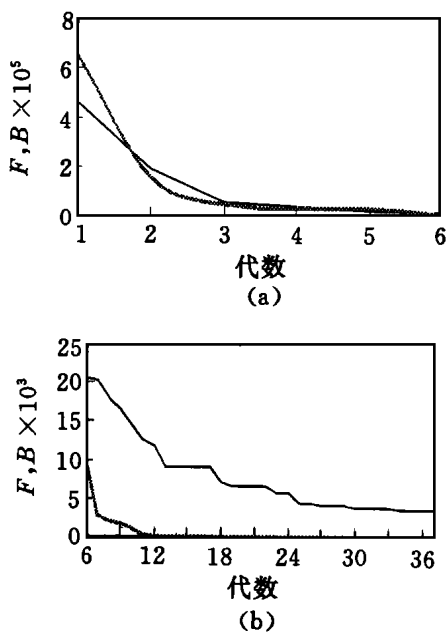
在宝钢实际生产中, 计划员一般需掌握两个月的合同, 因此这里的  $T = 12$ 。本文分别以 3 组数据为例, 在 IBM 586/266 兼容机上进行实验。其中,  $M = 3, M_1 = M_2 = 1, M_3 = 5$ , 最大代数为 100, 种群规模为 20,  $P_c = P_{m1} = P_{m2} = P_{m3} = 0.3$ , 不可行惩罚系数  $\gamma = 10$ 。  $\alpha$  和  $\beta_i$  根据客户对合同  $i$  的交货要求设定, 一般  $\alpha$  小于  $\beta$ , 本实验对于所有的  $i = 1, 2, \dots, N$ , 取  $\alpha = 1, \beta_i = 3$ , 计算结果如表 1 所示。其中,  $Bf$  为最好目标值,  $Wf$  为最差目标值,  $Mf$  为平均目标值。

表 1 计算结果

合同数 <i>N</i>	人机交互 目标值	遗传算法目标值			Bf 提前 合同数	Bf 拖期 合同数 (min)	时间
		Bf	Wf	Mf			
51	12 800	3 475	4 100	3 725	3	0	3
138	32 500	10 800	12 350	11 300	8	2	8
249	100 800	31 470	36 210	33 570	19	5	26

从表中可以看出, 算法获得的最好解优于人机交互结果, 提前和拖期的合同数较少。例如 51 个合同, 提前合同数为 3, 且提前时间均为 1 个半旬, 拖期合同数为 0。

为更直观地表示计算过程中目标值和可行性惩罚值的变化, 以 51 个合同的实验数据为例, 给出最好解的目标值  $F$  (实线) 和可行性惩罚值  $B$  (虚线) 的曲线如图 1 所示。图中  $B = 0$  时为可行解。

图 1 目标值  $F$  和可行性惩罚值  $B$  的曲线图

可以看出,  $B$  的收敛速度非常快, 在第 13 代就达到了 0 值, 表明很快就获得了可行解;  $F$  的收敛速度比  $B$  稍慢, 到 25 代接近最好值, 到 34 代达到最好值 (不再有明显改变)。

## 6 结 论

本文构造了钢铁企业的 MTO 管理系统, 并对系统中的合同计划方法进行了深入研究。以半旬为最小时间段, 以最小化全部合同的提前和拖期总惩罚为目标, 建立了合同计划编制的整数规划模型, 解决了计算机批量编制合同计划的建模问题。提出

一种基于可重复自然数编码和三变异算子的遗传算法, 并采用内点法和外点法相结合的搜索方法对模型进行求解。本算法获得的最好解优于人机交互结果, 最差值和最好值的相对偏差不超过 20%, 平均值和最好值的相对偏差不超过 8%, 提前和拖期的合同数很少, 计算速度很快。

## 参 考 文 献

- 1 Hendry L C, Kingsman B G. Customer enquiry management: Part of a hierarchical system to control lead times in make-to-order companies. J of the operational Research Society, 1993, 44(1): 61 ~ 70
- 2 Hendry L C, Kingsman B G. Job release: Part of a hierarchical system to manage manufacturing lead times in make-to-order companies. J of the Operational Research Society, 1991, 42(10): 871 ~ 883
- 3 Salvador M S. A solution to a special class of flow shop scheduling problem. In: Symposium of the Theory of Scheduling and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1973. 83 ~ 91
- 4 Hunsucker J, Shah J. Performance of priority rules in a due date flow shop. Int J of Mgmt Sci, 1992, 20(1): 73 ~ 89
- 5 Chang S C. Scheduling flexible flow shops with no setup effects. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1994, 10(2): 112 ~ 122
- 6 Lee I, Sikora R, Shaw M J. A genetic algorithm-based approach to flexible flow-line scheduling with variable lot sizes. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics - Part B: Cybernetics, 1997, 27(1): 36 ~ 54
- 7 汪定伟, 王梦光译. 线性优化及扩展理论与算法. 北京: 科学出版社, 1994. 230 ~ 250

## 作 者 简 介

张涛 男, 1970 年生。1992 年毕业于东北大学自动控制系, 现为东北大学系统工程研究所博士生。研究方向为生产计划与调度, 智能优化算法。

王梦光 女, 1936 年生。东北大学系统工程研究所教授, 博士生导师。研究方向为生产计划与调度, 智能优化算法, CIMS 系统设计与开发。

唐立新 男, 1966 年生。东北大学系统工程研究所所长, 教授。研究方向为生产计划与调度, 智能优化算法。

宋健海 男, 1966 年生。1983 年毕业于北京科技大学, 现为东北大学系统工程专业在职研究生。研究方向为 MIS 和 CIMS 系统的设计与开发。

杨建夏 男, 1966 年生。1998 年于东北大学工程专业硕士毕业, 现工作于宝钢计算机公司。研究方向为 MIS 和 CIMS 系统的设计与开发。