钢铁企业按订单生产模式下合同池优化

刘士新¹, 宋健海², 王梦光¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 上海宝信软件股份有限公司 MES 事业部, 上海 201900)

摘要: 基于对钢铁企业按订单生产模式下合同月计划编制策略、约束条件和优化目标的研究, 建立了合同月计划优化模型. 模型以最大化输入计划的加权合同重量为优化目标, 综合考虑了设备能力和合同月计划中各种产品规格、品种比例限制等约束. 采用惩罚函数法将约束最优化模型转换为无约束最优化模型. 设计了求解模型的向导局域搜索算法. 以某钢铁企业的实际合同月计划问题作为实例, 对模型和算法进行了系统地验证, 计算结果表明模型和算法在优化效果和运算效率方面均优于该企业现有合同计划系统.

关键词: 按订单生产; 合同计划; 向导局域搜索

中图分类号: C934 **文献标识码:** A

Order pool optimization for make-to-order production in steel plant

LIU Shi-xin¹, SONG Jian-hai², WANG Meng-guang¹

(1. School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning 110004, China;

2. MES Business Department, Shanghai Baosight Software Limited Company, Shanghai 201900, China)

Abstract: A monthly order plan optimization model is formulated based on the studies on the monthly order planning strategies, constraints and objectives under make-to-order (MTO) management mode in steel plant. The model objective is to maximize the total weighted-sum order weights compiled in the monthly order plan. Production capacity constraints and proportion relations between product sizes and varieties are synthetically taken into consideration in the model. The penalty function approach is used to transform the constrained optimization model into a non constrained one. A guided local search (GLS) algorithm is designed to solve the model. Taking a practical monthly order planning problem as an example, the model and algorithm are systematically tested for performance, and computation result shows that the model and algorithm outperform the existing order planning system of the plant.

Key words: make-to-order; order planning; guided local search

1 引言 (Introduction)

钢铁企业在 MTO (Make-To-Order) 管理体制下, 生产计划可划分为合同计划和日作业计划两个层次. 合同计划根据合同的交货期、各工序机组能力来安排一个合同的生产周期; 日作业计划安排日内各合同的生产批次和时序. 由于钢铁产品生产的特殊性, 在编制合同计划时既要考虑合同交货期的限制, 又要考虑生产过程中的工艺约束以及日计划的编制难度, 保证合同在各阶段各工序的品种、规格比例合理匹配. 目前我国钢铁企业的 ERP 系统在进行合同计划编制时, 均是根据合同的交货期及各工序加工时间, 对工序能力做粗平衡后安排合同在各工序的生产时间, 而合同在各阶段各工序的品种、规格合理匹配比例则由计划员凭经验保证.

合同计划按计划周期一般分为合同月计划、合同旬(周)计划及合同日计划. 合同月计划优化目标是最大化计划加权合同重量, 同时满足机组能力和规格品种匹配比例限制等多维约束. 根据问题的特点, 本文建立了多维背包问题 (multi-dimension knapsack problem, 简称 MDKP) 模型对合同月计划进行优化. 合同计划是钢铁企业生产管理的一个关键环节, 一直受到国内外学者的研究和关注^[1-3]. 目前研究主要针对已经计划投产的合同安排在各工序的生产时间, 本文研究内容是从合同预选池中选择合适的合同投产, 从合同计划流程上来说处于更上游.

2 数学模型 (Mathematical model)

记: $k (k = 1, 2, \dots, K)$ 为预选池中的合同号, $j (j = 1, 2, \dots, J)$ 为机组编号, $t (t = 1, 2, \dots, T)$ 为

计划周期的第 t 天, Ω_c 为属于品种 c ($c = 1, 2, \dots, C$) 的合同集合, ω_k 为合同 k 的优先权系数, W_k 为合同 k 的订货重量, LF_{kj} 为合同 k 在第 j 工序的最晚完成时间, d_{kj} 为合同 k 在第 j 工序的加工时间, RT_{jt} 为工序 j 在第 t 天的有效生产时间, $\varphi_c^{\min}$ 为合同计划中属于品种 c 的合同量占计划总量比例的下限, $\varphi_c^{\max}$ 为合同计划中属于品种 c 的合同量占计划总量比例的上限. 则 MDKP 可描述如下:

$$\max \sum_{k=1}^K \omega_k \cdot W_k \cdot x_k \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{LF_{kj} \leq t} x_k d_{kj} \leq \sum_{q=1}^t RT_{jq}, \quad t = 1, 2, \dots, T, \quad j = 1, 2, \dots, J, \quad (2)$$

$$\begin{cases} \varphi_c^{\min} \sum_{k=1}^K x_k W_k \leq \sum_{k \in \Omega_c} x_k W_k \leq \varphi_c^{\max} \sum_{k=1}^K x_k W_k, \\ c = 1, 2, \dots, C, \end{cases} \quad (3)$$

$$x_k = \begin{cases} 1, & \text{合同 } k \text{ 被编入合同计划,} \\ 0, & \text{合同 } k \text{ 不被编入合同计划,} \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (4)$$

其中:式(1)为目标函数,代表投入计划的加权合同量最大;式(2)为机组能力约束;式(3)为合同月计划中规格品种匹配比例约束;式(4)为变量的定义.

根据现场调研,某钢铁企业平均每月约有 3000 份合同需要排入合同计划,实际预选池中合同数量可达到 4000 份,对应 4000 个 0-1 变量,采用精确算法难以求解.本文针对问题特点设计了向导局部搜索(guided local search,简称 GLS)算法对模型进行求解.

3 向导局部搜索算法(Guided local search (GLS) algorithm)

3.1 算法框架(Algorithm framework)

GLS 是一种通用、简洁的优化技术,由 Voudouris 和 Tsang 提出^[4,5],适合求解组合优化问题^[4,6,7].GLS 利用问题的解特征在原目标函数上附加惩罚项,形成增强目标函数来引导算法在解空间的搜索过程.求解过程中,局部搜索过程被反复调用,当局部搜索过程陷入局部最优优点时,调整增强目标函数中的惩罚项,然后开始新的局部搜索过程.

GLS 根据问题的特点定义解特征,并为每个解特征定义特征成本,特征成本反映了解特征对目标函数的影响程度.记: S 为可行解集, g 为原始目标函数, λ 为规则化系数,代表附加惩罚项对目标函数

影响的相对重要程度; I_i 为解特征 i 的指示函数,如果解具有特征 i ,则 $I_i = 1$,否则 $I_i = 0$; c_i 为解特征 i 的特征成本, M 为解特征的个数, p_i 为解特征 i 的惩罚系数,反映了具有解特征 i 的解在搜索过程中被限制的程度,则增强目标函数 h 定义如下:

$$h(s) = g(s) + \lambda \cdot \sum_{i=1}^M p_i \cdot I_i(s). \quad (5)$$

GLS 算法流程如 GuidedLocalSearch 所示:

GuidedLocalSearch ($S, g, \lambda, [I_1, \dots, I_m], [c_1, \dots, c_M], M$)

Begin

$k := 0$;

随机或通过启发式规则产生初始解 $s_0 \in S$;

For $i = 1$ To M Do $p_i := 0$;

While StoppingCriterion Do

Begin

$h := g + \lambda \cdot \sum p_i \cdot I_i$;

$s_{k+1} := \text{LocalSearch}(s_k, h)$;

For $i = 1$ To M Do 计算 $util_i := I_i(s_{k+1}) \cdot c_i / (1 + p_i)$;

For 对使得 $util_i$ 极大化的每个 i Do $p_i := p_i + 1$;

$k := k + 1$;

End

输出对于原始目标函数 g 的最好解 s^* ;

End

3.2 算法设计(Design of the algorithm)

GLS 的典型应用是求解一些无约束组合优化问题,或者针对约束组合优化问题的解设计特定的编码,使得编码本身就对应一个可行解^[5].MDKP 中的约束(2)和(3)是实际生产问题中的约束,很难针对其特性设计解的编码使得约束自然满足.因此,本文采用惩罚函数法将原问题中约束(2)和(3)转换到目标函数中,转换后的目标函数具有如下形式:

$$\begin{aligned} g(s) = & \max \sum_{k=1}^K \omega_k \cdot W_k \cdot x_k - \\ & \lambda_1 \cdot \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \max\{0, (\sum_{LF_{kj} \leq t} x_k \cdot d_{kj} - \sum_{q=1}^t RT_{jq})\} - \\ & \lambda_2 \cdot \sum_{c=1}^C \max\{(\varphi_c^{\min} \cdot \sum_{k=1}^K x_k \cdot W_k - \sum_{k \in \Omega_c} x_k \cdot W_k), \\ & (\sum_{k \in \Omega_c} x_k \cdot W_k - \varphi_c^{\max} \cdot \sum_{k=1}^K x_k \cdot W_k), 0\}. \end{aligned} \quad (6)$$

其中 λ_1, λ_2 分别为约束(2)和(3)的不满足惩罚系数。

经过式(6)的转换后,模型(1)~(4)就转换为无约束优化问题,可应用 GLS 算法进行求解。算法中,解的编码为 $s = (x_1, x_2, \dots, x_K)$,变量的定义参见式(4)。解特征与解编码相对应,每个解有 K 个特征,解特征指示函数定义为 $I_i(s) = x_i, i = 1, \dots, K, s \in S$,特征成本 c_i 定义为 $c_i = \sum_{j=1}^J d_{ij} / (\omega_i \cdot W_i)$ 。求解过程中,在局部最优解 s^* 点,对于所有满足极大化效用函数式(7)的解特征对应的惩罚系数值 p_i 加 1:

$$util(s^*, f_i) = I_i(s^*) \cdot \frac{c_i}{1 + p_i} \quad (7)$$

惩罚系数 p_i 可视为解特征 i 被惩罚次数的计数器。如果某个解特征在先前的迭代过程中被惩罚的次数很多,那么式(7)中与其对应的 $(c_i / (1 + p_i))$ 值就会减小,从而会增加其他解特征被惩罚的机会,使得搜索空间更加多样化。

系数 λ 决定了解特征惩罚对搜索过程的影响程度。在局部搜索过程中,解的一次移动引起的增强目标函数值的改变 Δh 可以根据下式计算:

$$\Delta h = \Delta g + \lambda \cdot \sum_{i=1}^M p_i \cdot \Delta I_i \quad (8)$$

由式(8)可见,如果 λ 值较大,惩罚历史信息将完全地决定局部搜索过程;如果 λ 值为 0,局部搜索过程不能跳出局部最优点;如果 λ 值和 Δg 相当,那么解移动既会反映原目标函数值本身变化,又会去除被惩罚的解特征。

3.3 终止准则(Stop criterion)

算法终止准则采用指定迭代次数的方法,如果指定迭代次数为 $MaxIter$,则在过程 GuidedLocalSearch 中,While 循环执行 $MaxIter$ 次后,算法终止。

3.4 局部搜索算法(Local search algorithm)

记: $s = (x_1, x_2, \dots, x_K)$ 为随机产生的一个初始解, s^* 为算法运行后对于原目标函数的获得最好解, s 解邻域定义为 $N(s) = \{s' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_K) \mid \exists i \in \{1, 2, \dots, K\}, x'_i \neq x_i \text{ 且 } \forall k \neq i, x'_k = x_k, s' \in S\}$,则本文局部搜索算法如过程 LocalSearch 所示:

LocalSearch(s, h, g, N)

NonImprove := 0;

Do

搜索 $N(s)$ 中目标函数 $h(s)$ 的局部最优

解 s' ;

$$\Delta h = h(s') - h(s);$$

If $\Delta h > 0$ Then $s := s'$, NonImprove = 0;

Else NonImprove ++;

If $g(s) > g(s^*)$ Then $s^* := s$;

While (NonImprove < 2)

返回对于目标函数 g 的最好解 s^*

4 计算结果(Computation results)

为了测试模型和算法的优化效果,以某钢铁企业 40d 内的 4165 个实际生产合同数据为例,应用本文设计的模型和算法编制合同计划。参数 λ 设置过程如下:首先应用局部搜索算法求解问题(6)得到局部最优解 $g(s^*)$,求解过程中计算每次迭代目标

函数 $g(s)$ 改进的平均值,即 $\overline{\Delta g} = \frac{1}{Iter} \cdot \sum_{i=1}^{Iter} \Delta g$,其中 $Iter$ 为局部搜索过程的迭代次数,取 $\lambda = \overline{\Delta g} / (5 \cdot K)$ 。违反约束惩罚系数 $\lambda_1 = \lambda_2 = 5$,算法最大迭代次数 $MaxIter = 5000$ 。

实验中,每次从随机生成的初始解出发,GLS 运行 10 次。为了进一步分析 GLS 算法的有效性,实验中随机生成了 500000 个解。实验统计结果如表 1 所示,表中第 2 列为两种算法获得解的平均值;第 3 列为两种算法获得的最好解目标函数值;第 4 列为两种算法可行解比例的平均值。由表 1 可见,和随机方法比较,GLS 算法优化效果明显。

表 1 计算结果统计

Table 1 Statistical results of computation experiment

	平均值	最优值	可行解比例
GLS	2811222	3092345	100%
500000	1830256	2653872	65.35%

作者将本文方法编制的合同月计划与该企业实际应用的合同月计划在目标函数、设备能力利用系数两项指标进行了对比,结果表明:合同月计划目标函数值由 2829496 提高到 3092345,设备能力利用系数由 94.5% 提高到 97.0%。

5 结论(Conclusion)

基于钢铁企业在 MTO 管理模式下合同月计划的编制过程和优化目标,建立了钢铁企业合同月计划优化模型,并设计了求解模型的 GLS 算法。计算结果表明本文模型和算法是有效的,与企业实际应用的合同月计划相比,本文方法编制的合同月计划在优化目标、设备能力利用系数方面有明显改进。本文模型和算法经过适当的模块化设计后可以嵌入到

钢铁企业 ERP 系统合同计划编制模块中, 弥补目前 ERP 系统合同计划模块的不足. 通过开发配套的辅助功能模块后, 模型和算法可以反复调用, 实现合同月计划的滚动编制.

参考文献(References):

- [1] REDWINE C N, WISMER D A. A mixed integer programming model for scheduling orders in a steel mill [J]. *J of Optimization Theory and Applications*, 1974, 14(3): 305 - 318.
- [2] 滕学. 钢管厂热轧机组产品结构模型、合同分配模型及其优化分析[J]. 系统工程理论与实践, 1985, 5(2): 40 - 48.
(TENG Xue. Model and optimizing analysis for hot rolling product structure and order assigning in pipe plant [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 1985, 5(2): 40 - 48.)
- [3] 张涛, 王梦光, 唐立新, 等. 钢厂合同计划的模型与算法[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(5): 711 - 715.
(ZHANG Tao, WANG Mengguang, TANG Lixin, et al. The model and algorithm for the order planning of the steel plant [J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(5): 711 - 715.)
- [4] VOUDOURIS C, TSANG E. Partial constraint satisfaction problems and guided local search [C]// *Proc of the Second Int Conf on Practical Application of Constraint Technology*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1996: 337 - 356.
- [5] VOUDOURIS C, TSANG E. Guided local search and its application to the traveling salesman problem [J]. *European J of Operational Research*, 1999, 113(2): 469 - 499.
- [6] TSANG E, VOUDOURIS C. Fast local search and guided local search and their application to British Telecom's workforce scheduling problem [J]. *Operations Research Letters*, 1997, 20(3): 119 - 127.
- [7] VOUDOURIS C. *Guided local search for combinatorial optimization problems* [D]. Colchester, UK: Department of Computer Science, University of Essex, 1997.

作者简介:

刘士新 (1968—), 男, 博士, 副教授, 从事制造执行系统、项目管理、最优化方法等研究, E-mail: sxliu@mail.neu.edu.cn;

宋健海 (1965—), 男, 博士, 上海宝信软件股份有限公司高级工程师, 从事钢铁企业 ERP、MES 及企业信息系统整体解决方案等研究, E-mail: songjianhai@baosight.com;

王梦光 (1936—), 女, 教授, 博士生导师, 从事生产计划与调度、智能优化算法等研究, E-mail: mgwang@mail.neu.edu.cn.