

文章编号: 1001-0920(2005)06-0665-04

具有提前/拖期惩罚的热轧钢管批调度问题研究

李建祥¹, 唐立新¹, 吴会江²

(1. 东北大学 系统工程研究所, 辽宁 沈阳 110004; 2 沈阳工程学院 基础部, 辽宁 沈阳 110136)

摘要: 建立了具有提前/拖期惩罚的热轧钢管批调度问题的混合整数非线性规划模型, 提出并证明了给定合同排序下的最优组批方式, 从而将原问题转化为易求解的合同排序问题。同时, 建立了转化问题的数学模型并设计了遗传算法。仿真实验验证了模型和算法的有效性。

关键词: 热轧钢管; 批调度; 提前/拖期; 遗传算法

中图分类号: TP29; C935 **文献标识码:** A

Hot rolling steel tube batch scheduling with earliness/tardiness penalties

L I J ian-x iang¹, T A N G L i-x i n¹, W U H u i-j iang²

(1. Institute of Systems Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2 Basic Class Department, Shenyang College of Engineering, Shenyang 110136, China Correspondent: L I J ian-x iang, E-mail: jianxiang-li@hotmail.com)

Abstract: The hot rolling steel tube batch scheduling problem with earliness/tardiness penalties as a mixed integer non-linear programming model is discussed. The optimal batching method under given order sequencing is presented and proved. Based on the optimal batching method, the original problem is changed into an easier sequencing problem. A model for the new problem is then developed and a genetic algorithm is designed. The computation results show the effectiveness of the model and algorithm.

Key words: hot rolling steel tube; batch scheduling; earliness/tardiness; genetic algorithm

1 引言

热轧钢管生产的主要特点是: 1) 以轧批为单位组织生产; 2) 同一轧批内合同间的转产不需要设置时间及成本; 3) 不同轧批之间的转产存在顺序相关的设置时间及成本。上述特点决定了热轧钢管调度问题主要有两方面^[1]: 1) 组批计划, 即将多个合同根据生产工艺及能力约束组成轧批, 同类合同(即具有相同参数的合同)才可以组成一个轧批; 2) 轧批排序计划, 即将组成的多个轧制批进行生产顺序排定, 使机器设备总的调整时间最短。总体上热轧钢管调度问题可归结为单机批调度问题^[2]。

文献[3]建立了组批模型并设计了遗传算法;

[4]建立了轧批排序模型并设计了遗传算法; [5]使用基于知识的启发式方法确定轧批的顺序; [6]采用人工智能方法确定轧批的顺序。它们的共同特点是将原问题分解成组批和排序两个子问题分别求解。除文献[4]外, 其余均未考虑合同交货期的影响。

事实上, 每个合同都有不同的交货期, 如果合同在其交货期之前或之后完工, 则会带来提前或拖期成本。这要求合同应尽量安排在接近其交货期的时间内生产。可见, 合同的交货期影响合同的最佳生产时间, 即影响合同的排序。因此, 有必要在研究热轧钢管批调度问题时, 考虑交货期的影响。文献[7]研究了具有提前/拖期惩罚的单机批调度问题并设计

收稿日期: 2004-06-10; 修回日期: 2004-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(70171030; 60274049); 霍英东青年教师基金项目(81073)。

作者简介: 李建祥(1974—), 男, 江西南昌人, 博士生, 从事生产计划与调度、供应链管理研究; 唐立新(1966—), 男, 黑龙江绥化人, 教授, 博士生导师, 从事生产计划与调度、供应链建模与优化等研究。

了启发式算法,但其背景是一般制造业,与热轧钢管生产有较大差别.本文则研究具有提前/拖期惩罚的热轧钢管批调度问题.

2 数学规划模型

2.1 基本假设

假设1 各合同的加工时间已知,且与加工顺序无关.

假设2 对于合同量大于轧制最高定额^[1]的合同,已通过预处理的方式,将其分解为两个或多个小于轧制最高定额的部分,并将它们视作不同的合同.

假设3 合同只能安排在一个轧批内连续生产.

2.2 模型

$$\min z = \sum_{i=1}^N (\alpha E_i + \beta T_i) + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{n_k} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^N q_{ij} X_{i,k,n_k,n} X_{j,k,1,n+1} + \sum_{k=1}^K \sum_{m=2}^{n_k} M \delta_{km}, \quad (1)$$

$$s.t. \quad X_{ikmn} = 1, i = 1, 2, \dots, N; \quad (2)$$

$$X_{ikmn} = 1, k = 1, \dots, K, m = 1, \dots, n_k; \quad (3)$$

$$X_{ik1n} = 1, k = 1, \dots, K, n = 1, \dots, K; \quad (4)$$

$$X_{ik1n} = 1, n = 1, \dots, K; \quad (5)$$

$$e_i X_{ikmn} \leq Q, k = 1, \dots, K; \quad (6)$$

$$X_{ikmn} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, N, k = 1, \dots, K, m = 1, \dots, n_k, n = 1, \dots, K; \quad (7)$$

$$n_k = \{x \mid x \leq 1 \text{ 且 } x \leq Z\}, k = 1, \dots, K; \quad (8)$$

$$K = \{x \mid x \leq 1 \text{ 且 } x \leq Z\}. \quad (9)$$

其中: $d_i, e_i, c_i, E_i, T_i, \alpha, \beta$ 分别为合同 i 的交货期、合同量、完工时间、提前时间、拖期时间、单位提前成本、单位拖期成本; h_{ij} 为轧批间的转产调整时间(前一轧批的最后一个合同是合同 i , 后一轧批的第一个合同是合同 j); q_{ij} 为轧批间的转产设置成本(前一轧批的最后一个合同是合同 i , 后一轧批的第一个合同是合同 j); Q 为最高轧制定额; M 为一个足够大的数(作为惩罚用于避免不同类的合同安排在同一轧批); K 为决策变量, 表示组成的轧批数; n_k 为决策变量, 表示轧批 k 含有的合同数; X_{ikmn} 为决策变量, 如

果合同 i 在轧批 k 的位置为 m 且轧批 k 在第 n 个批位置, 则 $X_{ikmn} = 1$, 否则 $X_{ikmn} = 0$; δ_{km} 为决策变量, 如果轧批 k 的第 m 个合同与该轧批的第一个合同是同类型合同, 则 $\delta_{km} = 1$, 否则 $\delta_{km} = 0$.

目标函数(1) 追求总成本最小, 总成本包括3项: 总提前/拖期成本、轧批总设置成本和不同类合同安排在同一轧批内的惩罚. 约束(2) 确保每个合同只能占据一个轧批的一个位置; 约束(3) 确保每个轧批的每个位置上只能有一个合同; 约束(4) 确保一个轧批只能占据轧批顺序中的一个位置; 约束(5) 确保轧批顺序中的一个位置只有一个轧批; 约束(6) 确保每个轧批内包含的合同总量不超过轧制最高定额; 约束(7) ~ (9) 是变量取值约束.

3 模型的求解

注意到模型具有提前/拖期(E/T) 调度^[8] 问题的性质, 而且还包括组批, 所以比一般的E/T 调度问题复杂. 另外, E_i, T_i 和 δ_{km} 的值与合同的组批和排序结果有关, 很难用明确的表达式描述, 而且下标 k 和 n_k 是决策变量, 即该模型是一个变结构的数学规划模型, 因此该模型求解起来比较困难. 本文的求解策略是先将原问题转化为一个较容易解决的问题, 然后建立相应模型进行求解.

在问题转化前, 先作如下假设, 并讨论假设的合理性.

假设4 如果一个合同按照组批的条件既可以在前一个轧次(作为该轧次的最后一个合同), 又可以在后一个轧次(作为该轧次的第一个合同), 则将该合同放在前一轧次内的组批方案与将该合同放在放在后一轧次内的组批方案相比, 由此可能引起的提前/拖期成本的增加可忽略不计.

假设5 将轧批的最后一个合同拆出去, 新设立一个轧批, 并安排在原轧批的紧后, 由此造成的提前/拖期成本的可能节省小于增加的设置成本.

对假设4的讨论: 两种方案组批方式下, 该合同的完工时间仅差设置时间. 而设置时间一般为几个小时, 因此该合同在两种方案下, 完工时间上仅差几个小时. 而交货期的单位通常以天记, 差几个小时可以认为是同一天, 所以对于交货期的影响很小, 由此带来的提前/拖期的变化是可以忽略的. 因此, 假设4在实际生产经营中可以认为是成立的.

对假设5的讨论: 假设5中的情况是假设4描述情况的一个特例, 因此也是成立的.

3.1 问题的转化

定理1 给定一个合同排序方案, 在不影响合同排序的前提下, 依序将同类合同尽可能多地组合到一起, 在不超过最高轧制定额的前提下, 组成一个

轧批 这种组批方式是在给定合同排序方案下的最优组批方式

在证明定理 1 之前, 首先给出几点说明: 1) 不同的组批方案造成不同的轧批设置成本和提前 / 拖期成本, 最优组批方式是总成本最小的组批方式; 2) 组批只能在同类合同间进行, 又因为合同排列顺序不能更改, 所以组批只能在相邻的同类合同间进行; 3) 依序将同类的合同尽可能多地组合到一起, 在不超过最高轧制定额的前提下尽量放在前一个批内, 组成一个轧批, 这是一种组批方式, 设为方式 M . 假设 M 下, 任取两个相邻的轧批 A 和 B , 其中 A 包括多个合同 (如果不能取到这样的轧批, 定理 1 自然成立), 设 A 中的最后一个合同为 a . 至此, 定理 1 的证明等价于证明“ M 是总成本最小的组批方式.”

证明 反证法 假设 M 不是总成本最小的组批方式, 则 a 的位置必可变动为: 1) 将 a 放入 B 中, 这种情况在 A 和 B 中的合同是同类合同, 且 a 加入到 B 后, B 中包含的合同量不超过最高轧制定额限制的情况下成立; 2) 在 A 和 B 之间新设立一个轧批 C , 将 a 放入 C 中. 对于 1), 根据假设 4, 不如原方案; 对于 2), 根据假设 5, 不如原方案

因此, 在给定的合同排序下, 如果按照定理 1 提出的最优组批方式进行组批, 则可得到该合同排序下的最好调度方案. 于是原问题的求解可转化为: 首先找出所有的合同排序方案, 按照最优组批方式获得每个合同排序下的最好调度方案; 然后对这些最好调度方案进行评价, 从中找出最优方案即为原问题的最优解

3.2 转化问题的数学模型

可用如下模型表示上述问题的转化, 目标是寻找一个最优 σ^* , 使 $f(\sigma)$ 取最小值 $f(\sigma^*)$:

$$\min_{\sigma \in \Pi} f(\sigma) = \sum_{i=1}^N (\alpha E_i + \beta T_i) + g(\sigma). \quad (10)$$

其中: Π 为合同排序方案的集合 (共有 $N!$ 个排序方案); σ 为一给定的合同排序方案, $\sigma \in \Pi$; $f(\sigma)$ 为 σ 排序方案下的提前 / 拖期成本和设置成本的总和; $g(\sigma)$ 为 σ 排序方案下经最优组批方式进行组批后所形成的轧批之间的设置总成本

3.3 遗传算法

综上所述, 转化问题及其模型的求解实质是穷尽搜索所有的合同排序方案并进行评价, 从中选择最优从而得到最优解. 然而实际应用中, 由于规模较大, 穷尽比较困难, 能够评价尽可能多的合同排序方案找出近优解即可. 遗传算法^[9,10] 是较好的方法之一.

编码和适值函数的计算是使用遗传算法的两

个关键. 对于排序 (调度) 问题来说, 自然数编码是一种理想的编码方式. 下面介绍模型适值函数 (目标函数) 值的计算方法

E_i, T_i 和 $g(\sigma)$ 均是 σ 的函数, 受 σ 的影响, 不同的 σ 下, 它们的值不同, 从而 $f(\sigma)$ 的值不同. 给定 σ 时, $f(\sigma)$ 值需通过计算 E_i, T_i 和 $g(\sigma)$ 得到, 而 E_i 和 T_i 的值只要计算出 c_i 即可. 因此 $f(\sigma)$ 的计算步骤为: 给定 σ , 按照最优组批方式, 将排好序的合同进行组批, 再按排列顺序依次计算每个合同的完工时间 c_i . 计算公式如下:

$$c_{(i)} = \begin{cases} p_{(i)}, & (i) = 1; \\ c_{(i-1)} + p_{(i)}, & (i) > 1 \text{ 且第 } (i-1) \text{ 个合同} \\ & \text{与第 } (i) \text{ 个合同在同一轧批;} \\ c_{(i-1)} + p_{(i)} + t_{(i-1)(i)}, & (i) > 1 \text{ 且第 } (i-1) \text{ 个合同} \\ & \text{与第 } (i) \text{ 个合同不在同一轧批} \end{cases} \quad (11)$$

其中: (i) 表示排在第 i 个位置的合同所对应的合同号, $P_{(i)}$ 为第 (i) 个合同的加工时间, $t_{(i-1)(i)}$ 为第 (i) 个和第 $(i-1)$ 个合同所在的两个轧批间的转产调整时间

$g(\sigma)$ 的计算是只要从一个轧批转到另一个轧批, 则增加一次设置成本, 计算公式如下:

$$g(\sigma) = g(\sigma) + q_{(i)(i+1)},$$

当且仅当第 (i) 个合同是一个轧批的最后一个合同, 第 $(i+1)$ 个合同是下一轧批的第一个合同. (12)

举一个例子来说明 $f(\sigma)$ 的计算步骤. 假设 $N = 8$, 给定一个 σ 为 (3, 2, 1, 4, 5, 6, 7, 8), 括号内的数字对应合同号. 并且假设, 合同 1, 2, 3 是同类的; 合同 5, 6 是同类的, 合同 7, 8 是同类的. 同类的合同才能组批. 已知合同 1, 2, 3 的总量超过了最高轧制定额; 而合同 2, 3 的总量低于最高轧制定额; 合同 5, 6 的总量低于最高轧制定额; 合同 7, 8 的总量低于最高轧制定额. 按照最优组批方式进行组批, 则可将合同 3 和 2 组成一个轧批, 1 单独构成一个轧批, 4 单独构成一个轧批, 5 和 6 共同组成一个轧批, 7 和 8 共同组成一个轧批. 组完批后的 σ 为 (3, 2, 1, 4, 5, 6, 7, 8), 括号内同一下划线内的合同组成一个轧批. 不失一般性, 设初始时刻为 0, 则

$$\begin{aligned} c_3 &= p_3, \\ E_3 &= \max\{0, d_3 - c_3\}, \\ T_3 &= \max\{0, c_3 - d_3\}; \\ c_2 &= c_3 + p_2, \\ E_2 &= \max\{0, d_2 - c_2\}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$T_2 = \max\{0, c_2 - d_2\}; \quad (14)$$

$$g(\mathcal{O}) = q_{21}; \quad (15)$$

$$c_1 = c_2 + p_1 + t_{21},$$

$$E_1 = \max\{0, d_1 - c_1\},$$

$$T_1 = \max\{0, c_1 - d_1\}; \quad (16)$$

$$g(\mathcal{O}) = q_{21} + q_{14}; \quad (17)$$

$$c_4 = c_1 + p_4 + t_{14},$$

$$E_4 = \max\{0, d_4 - c_4\},$$

$$T_4 = \max\{0, c_4 - d_4\}; \quad (18)$$

$$g(\mathcal{O}) = q_{21} + q_{14} + q_{45}; \quad (19)$$

$$c_5 = c_4 + p_5 + t_{45},$$

$$E_5 = \max\{0, d_5 - c_5\},$$

$$T_5 = \max\{0, c_5 - d_5\}; \quad (20)$$

$$c_6 = c_5 + p_6,$$

$$E_6 = \max\{0, d_6 - c_6\},$$

$$T_6 = \max\{0, c_6 - d_6\}; \quad (21)$$

$$g(\mathcal{O}) = q_{21} + q_{14} + q_{45} + q_{67}; \quad (22)$$

$$c_7 = c_6 + p_7 + t_{67},$$

$$E_7 = \max\{0, d_7 - c_7\},$$

$$T_7 = \max\{0, c_7 - d_7\}; \quad (23)$$

$$c_8 = c_7 + p_8,$$

$$E_8 = \max\{0, d_8 - c_8\},$$

$$T_8 = \max\{0, c_8 - d_8\}; \quad (24)$$

所以

$$f(\mathcal{O}) = \sum_{i=1}^8 (\alpha E_i + \beta T_i) + q_{21} + q_{14} + q_{45} + q_{67} \quad (25)$$

4 计算结果与分析

测试了5种不同规模的批调度问题, $N \in \{25, 50, 100, 200, 400\}$. 每一种规模由随机产生的10组数据组成, 共50组数据. 每组数据下运行10次, 性能取平均值. 选定的性能指标包括: 目标函数归一化值、运行时间、平均目标函数值与最好目标函数值的相对误差(MORE)、最坏目标函数值与最好目标函数值的相对误差(WORE). 算法使用VC++编写, 所有实验是在PIII1.0G, 内存120M的微机上进行, 操作系统是Windows XP.

计算实验包括如下两部分:

1) 遗传算法的参数优化配置. 最终在染色体数目50, 100和200中选择染色体数目为100; 在遗传代数100, 200和400中选择遗传代数为200; 在交叉概率0.7, 0.8和0.9中选择交叉概率为0.8; 在变异概率0.03, 0.05和0.1中选择变异概率为0.05.

2) 在选定的遗传算法参数下, 对不同规模问题进行计算, 并与不考虑交货期影响的模型^[1]结果对比, 结果如表1所示.

表1 考虑交货期和不考虑交货期的模型运算结果比较

规模	不考虑交货期影响的模型				考虑交货期影响的模型			
	归一化值	运算时间/s	MORE	WORE	归一化值	运算时间/s	MORE	WORE
25	1.0000	0.37	0.062	0.133	0.6587	0.30	0.052	0.059
50	1.0000	0.57	0.055	0.112	0.7346	0.57	0.025	0.041
100	1.0000	1.19	0.025	0.048	0.8884	1.33	0.008	0.016
200	1.0000	3.33	0.009	0.018	0.9639	4.33	0.004	0.006
400	1.0000	10.77	0.003	0.005	0.9897	13.03	0.001	0.002

结果表明: 1) 对于25, 50, 100, 200, 400个合同的批调度问题, MORE分别为5.2%, 2.5%, 0.8%, 0.4%, 0.2%; WORE分别为5.9%, 4.1%, 1.6%, 0.6%, 0.2%; 计算时间少于15s, 因而算法是有效的; 2) 对于不同规模问题, 考虑交货期影响均比不考虑交货期影响节省成本, 节省的幅度在1%~34%之间. 因而考虑交货期的影响是必要且有效的.

5 结论

1) 热轧钢管调度问题可归结为具有提前/拖期惩罚的单机批调度问题.

2) 建立了问题的混合整数非线性规划模型, 提出了给定合同排序下的最优组批方式并进行了证

明, 实现了问题的转化并建立了数学模型.

3) 设计了求解转化问题模型的遗传算法, 对25, 50, 100, 200, 400个合同的批调度进行了测试. 结果表明: MORE小于5.2%, WORE小于5.9%, 计算时间少于15s; 考虑交货期影响比不考虑交货期影响能节省成本1%~34%.

参考文献(References)

- [1] 唐立新, 张国范, 杨自厚, 等. 热轧钢管轧批排序模型及算法[J]. 钢铁, 1999, 34(4): 73-76.
(Tang L X, Zhang G F, Yang Z H, et al. Research on hot rolling scheduling for tube production[J]. Iron & Steel, 1999, 34(4): 73-76.)

(下转第678页)

参考文献(References)

- [1] Abutaleb A S Automatic thresholding of gray-level pictures using two-dimensional entropy [J]. *Computer, Vision Graphic Image Process*, 1989, 47(1): 22-32
- [2] 郭国栋, 马颂德. 彩色图像分割[J]. *中国图像图形学报*, 1998, 3(11): 918-921.
(Guo G D, Ma S D. Color image segmentation [J]. *J of Image and Graphics*, 1998, 3(11): 918-921.)
- [3] 王小平, 曹立明. 遗传算法-理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 5-10
- [4] Shanbhag A G Utilization of information measure as a means of image thresholding [J]. *Computer Vision, Graphics, Image Processing-Graphical Model and Image Processing*, 1994, 56(5): 414-419
- [5] Juliana F, Camapum W, Mark H F. Spatial-feature parametric clustering applied to motion-based segmentation in camouflage [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2002, 85(2): 144-157
- [6] Constantine K, Ioannis P. Segmentation of ultrasonic images using support vector machines [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2003, (24): 715-727.
- [7] 张毅军, 吴雪菁, 夏良正. 二维熵阈值图像阈值分割的快速递推算法[J]. *模式识别与人工智能*, 1997, 10(3): 261-265.
(Zhang Y J, Wu X J, Xia L Z. A fast recurring algorithm for two-dimensional entropic thresholding for image segmentation [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1997, 10(3): 261-265.)
- [8] Bhanu B, Lee S, Ming J. Self-optimizing image segmentation system using a generic algorithm [A]. *Proc of the 4th Int Conf on Generic Algorithms* [C]. San Diego: Morgan Kaufmann Publishers, 1991: 362-369
- [9] Wiro J Niessen, Koen L Vincken. Nonlinear multiscale representations for Image Segmentation [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1997, 66(2): 233-245
- (上接第 655 页)
- [8] Daaforz J, Bernussou J. Robust dynamic output feedback control for switched systems [A]. *Proc of the 41st IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Las Vegas, 2002: 4389-4394
- [9] Cuzzola F A, Morar M. An LM I approach for H analysis and control of discrete-time piecewise affine systems [J]. *Int J Control*, 2002, 75(16/17): 1293-1301
- (上接第 668 页)
- [2] Potts C N, Kovalyov M Y. Scheduling with batching: A review [J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, (120): 228-249
- [3] 李大卫, 王莉, 王梦光. 基于遗传算法的钢管生产批量计划[J]. *系统工程理论方法应用*, 1998, 7(3): 22-27.
(Li D W, Wang L, Wang M G. Production lot planning of steel pipe based on genetic algorithm [J]. *Systems Engineering-Theory Methodology Applications*, 1998, 7(3): 22-27.)
- [4] 路飞, 田国会. 用自适应遗传算法求解轧制顺序调度问题[J]. *山东大学学报*, 2003, 33(3): 311-313
(Lu F, Tian G H. Solving scheduling problems of rolling sequence with an adaptive genetic algorithm [J]. *J of Shandong University*, 2003, 33(3): 311-313.)
- [5] Fukaya N, Katagiri T. Expert system for manufacturing sequence determination in hot rolling process of seamless steel pipe [J]. *Kawasaki Steel Gihō*, 1991, 23(3): 191-196
- [6] Siddique M. A knowledge-based system for process planning in a seamless steel tube plant [D]. Birmingham: Aston University, 1990
- [7] 马建辉, 牛海军. 提前/拖期惩罚的单机批调度优化问题研究[J]. *制造业自动化*, 2002, 24(7): 65-67.
(Ma J H, Niu H J. Research on single machine batch scheduling with earliness/tardiness penalties [J]. *Manufacturing Industry Automation*, 2002, 24(7): 65-67.)
- [8] Baker K, Scudder G. Sequencing with earliness and tardiness penalties: A review [J]. *Operations Research*, 1990, (38): 22-36
- [9] 于海斌, 薛劲松, 王浩波, 等. 基于遗传算法的单机提前/拖期调度方法研究[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(2): 209-214
(Yu H B, Xue J S, Wang H B, et al. GA-based approach to single machine scheduling with general early-tardy penalty weights [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(2): 209-214.)
- [10] 王凌. 智能优化算法及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001