

文章编号: 1000-8152(2009)07-0767-04

用于编制热轧生产流程的新型Meta-heuristic算法

张健欣^{1,2}, 童朝南¹

(1. 北京科技大学 信息工程学院, 北京 100083; 2. 内蒙古工业大学 信息工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 带钢热轧具有特殊的生产工艺约束, 其生产流程的编制是钢铁企业生产的关键, 因此提出采用并行策略的基于多旅行商问题(MTSP)热轧轧制模型. 该模型不但考虑了板坯在宽度、厚度和硬度跳变时的约束, 还考虑了同一轧制单元内轧制板坯数量的约束. 并设计了新的Meta-heuristics算法求解此模型. 通过对某热轧带钢厂生产数据的仿真实验, 表明模型和算法能有效地给出满意的排产结果, 并且具有较高的执行效率.

关键词: 调度; 轧制计划; 多旅行商问题; Meta-heuristics算法

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

A novel Meta-heuristic algorithm for hot rolling scheduling

ZHANG Jian-xin^{1,2}, TONG Chao-nan¹

(1. School of Information Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot Nei Mongol 010051, China)

Abstract: Hot strip-rolling is a process with special production constraints; the scheduling of which is a critical work for the strip-production in a steel plant. A multiple traveling salesperson problem(MTSP) model based on a parallel strategy is presented to solve the scheduling problem. This model not only takes into account the variations in slab width, gauge and hardness, but also considers the restriction on the number of slabs in a single batch of rolling. A novel Meta-heuristic algorithm is put forward for solving the MTSP. A set of practical data from a steel plant is employed in a simulation; the results show the effectiveness and efficiency of the model and the algorithm.

Key words: scheduling; rolling plan; multiple traveling salesperson problem(MTSP); Meta-heuristics algorithm

1 引言(Introduction)

带钢热轧轧制计划的编制是钢铁企业一体化调度的核心内容, 是钢铁生产管理的主要任务, 所起到的作用是至关重要的. 因此长期受到研究者的关注^[1~4]. 热轧计划编制属于NP难问题, 很难找出满足时间多项式的精确解, 故一般都采用Heuristics算法或Meta-heuristics算法.

本文针对带钢热轧计划编制问题, 建立了基于多旅行商问题(multiple traveling salesperson problem, MTSP)模型, 采用并行策略, 在满足热轧产品特殊的生产工艺及设备的约束条件的前提下, 同时产生若干轧制单元的编排计划, 很好地维持了各轧制单元间轧制板坯数量的平衡, 有效地保证了产品的质量, 降低了生产成本. 并且提出一种把局部搜索算法(local search)与遗传算法(genetic algorithm)相结合的新的Meta-heuristics算法, 来求解热轧生产计划的编制问题的MTSP模型.

2 生产工艺和约束条件(Production processes and constraints)

热轧计划编制是根据订单中产品的宽度、厚度、硬度等来确定的, 生成一个轧制单元计划要考虑3个因素^[2]: 产品质量、轧辊更换成本和轧辊的磨损. 为了保证产品质量, 要使带钢宽度变化呈非递增趋势. 轧制一定长度的板坯后就要更换轧辊, 由于更换轧辊的成本很高, 要求每个轧制单元轧制的带钢总长度在不超过最大轧制长度的前提下尽可能大. 此外, 希望相邻轧制的带钢的硬度变化和厚度变化也不要太大.

3 MTSP模型及数学描述(MTSP model and mathematical formulation)

传统的热轧调度是基于串行策略, 所产生热轧计划往往只有某几个轧制单元内订单安排比较合理, 其余的轧制单元订单的排序则非常糟糕^[2]. 本文采用并行策略, 即对合同预选池中的 N 个订单同时找

出 M 个轧制单元的调度,每个轧制单元中订单的排序是全局最优的.这种并行策略可以用MTSP建模.通过引入 M 个虚拟点,可以将MTSP问题转化为一般的TSP问题.

MTSP模型有多种整数规划的公式化描述^[5].本文建立如下的热轧计划编制MTSP模型的整数规划公式.首先定义所用到的变量和参数:

U 为实际订单集合, V 为全体订单集合(包括虚拟订单);

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{订单}j\text{紧跟在订单}i\text{之后轧制,} \\ 0, & \text{其他情况, } i, j \in U, i \neq j; \end{cases}$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & j\text{是第}i-N\text{个单元的第一个订单,} \\ 0, & \text{其他情况, } i \in V \setminus U, j \in U; \end{cases}$$

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & i\text{是第}j-N-1\text{个单元最后的订单,} \\ 0, & \text{其他情况, } i \in U, j \in V \setminus U; \end{cases}$$

$X_{i(N+1)} = 1$ (i 是第 M 个单元最后的订单, $i \in U$);

C_{ij} 表示订单 j 紧跟订单 i 轧制的惩罚值,则

$$C_{ij} = P_{ij}^w + P_{ij}^g + P_{ij}^k, \quad i, j \in U, i \neq j.$$

其中 P_{ij}^w , P_{ij}^g 和 P_{ij}^k 分别为订单 j 紧跟订单 i 轧制时宽度、厚度和硬度的惩罚值.此外,为了符合MTSP的定义,作如下规定:

$$C_{ij} = 0, \quad i \in U, j \in V \setminus U;$$

$$C_{ij} = 0, \quad i \in V \setminus U, j \in U;$$

$$C_{ij} = \infty, \quad i, j \in V \setminus U;$$

$$C_{ii} = \infty, \quad i \in V.$$

则整数规划公式表达如下:

$$\min \lambda_k \sum_{i=1}^{N+M} \sum_{j=1}^{N+M} C_{ij} X_{ij}, \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{N+M} X_{ij} = 1, \quad j \in V, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N+M} X_{ij} = 1, \quad i \in V, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \sum_{i,j \in U, i \neq j} X_{ij} \leq |S| - 1, \\ 2 \leq |S| \leq N + M - 2, \\ S \subseteq V \setminus \{1\}, \end{cases} \quad (4)$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j \in U. \quad (5)$$

公式(1)是要最小化的总惩罚值函数.其中: λ_k 是惩罚因子,可以避免出现有的旅行商只访问了很少的几个城市,而其余的旅行商访问的城市太多.也就

是避免了轧制单元间板坯数量不均衡的情况,保证带钢质量.假设轧制单元内限制轧制的板坯数为 L_k ,则

$$\lambda_k = \begin{cases} \infty, & \text{如果轧制单元}k\text{的订单数大于}L_k, \\ 1, & \text{其他情况.} \end{cases}$$

公式(2)和公式(3)是为了确保结果的可行性.公式(4)是消除子回路约束^[5].公式(5)定义了变量的取值范围.

4 改进Meta-heuristics算法(Modified Meta-heuristics algorithm)

求解TSP问题的邻域算法主要是 k -Opt移动法^[6,7]、模拟退火和禁忌搜索算法^[8].遗传算法属于一类自适应随机搜索算法,是解决组合优化问题的理想工具^[9,10].

本文算法采用遗传算法的基本框架,并与改进的LK(Lin-Kernighan)邻域算法相结合.采用自然编码方式和单亲遗传的策略^[9].交叉算子采用改进的LK邻域结构的邻域搜索算法.本文对LK邻域算法它做了改进,使其能够适应热轧调度这种非对称TSP问题.改进邻域搜索算法的步骤如下:设父染色体为行程 T .

步骤1 将父个体 T 中两点间距离最大的有向弧去掉(设为 i 和 j 两点),得到一个Hamiltonian路径;

步骤2 固定端点 i ,在其余点中选择到点 j 最近的点 k ,作点 k 到 j 的有向弧,得到stem and cycle结构^[7];

步骤3 将连接 $k-1$ 到 k 和 k 到 $k+1$ 的两条弧去掉,作点 $k-1$ 到点 $k+1$ 的有向弧,就构成了新的Hamiltonian路径,连接这个Hamiltonian路径的端点,则得到一个新的行程 T' ;

步骤4 计算新行程 T' 的适应度函数,若优于行程 T ,则以 T' 为 T 所产生的子个体.否则回到步骤1.

重复迭代过程,直到找到第一个比当前父个体 T 适应度更优的个体作为子个体.

变异算子采用文献^[9]中的MUT3算子.选择的方法采用随机联赛,联赛规模为2,并采取精英保留策略.用最近邻近点的启发式构造方法产生初始种群.

5 仿真结果(Simulation results)

为了验证本文提出的热轧计划编制模型及算法,采用某热轧带钢厂的生产数据进行了仿真实验.要求将68个订单安排在3个轧制单元轧制.本文中的算法采用如下参数:种群规模为100,交叉率 P_c 为0.9,

变异率 P_m 为 0.05, 停止规则为迭代进行 40 代. 假设各轧制单元允许最大轧制订单数量 $L_k = 25$.

文献[2]给出了手工编制的轧制计划, 其总惩罚值为 368, 以及一种 MGA 方法编制的轧制计划, 其总惩罚值为 274. 但这种 MGA 方法所编制的计划出现了某个轧制单元仅轧制 3 个板坯, 而其他轧制单元的板坯过多的情况. 本文算法产生的编制计划则很好地克服了这个缺点, 各轧制单元轧制订单数如表 1 所示, 都小于要求的最大轧制数 25, 保证了轧制单元内所轧制的订单数不会太多或太少, 更好地保证了产品的质量. 本文算法产生的最优轧制计划如表 2 所

示, 总惩罚值为 303, 较手工编制的轧制单元计划有明显的改进. 其总惩罚函数在各代的平均值和最小值如图 1 所示, 可见算法的收敛速度较快, 经过较少的迭代代数就能得到满足要求的解, 比文献[2]中的 MGA 算法要经过 6000 代才收敛的结果有了极大的改善. 通过仿真结果的比较, 说明了本文算法的有效性.

表 1 各轧制单元轧制板坯数
Table 1 The number of order in rolling turn

轧制单元	1	2	3
轧制板坯数	24	24	20

表 2 改进 Meta-heuristics 算法产生的热轧计划

Table 2 The result of modified Meta-heuristics algorithm for hot rolling strip plan

No.	宽度	厚度	硬度	No.	宽度	厚度	硬度	No.	宽度	厚度	硬度	No.	宽度	厚度	硬度
1	1530	5.88	3	18	1500	5.89	4	35	1250	4.02	3	52	1250	4.03	5
2	1530	5.89	3	19	1500	5.89	4	36	1230	4.02	2	53	1150	4.03	4
3	1530	5.89	4	20	1500	5.89	4	37	1230	4.02	2	54	1150	4.03	4
4	1500	5.89	4	21	1500	5.89	4	38	1230	4.02	2	55	1150	4.03	4
5	1500	5.89	4	22	1500	5.89	4	39	1230	4.02	2	56	1150	4.02	4
6	1500	5.89	4	23	1500	5.89	4	40	1200	4.02	2	57	1050	4.01	4
7	1500	5.89	4	24	1500	5.89	4	41	1200	4.02	2	58	1050	4.01	4
8	1500	5.89	4	25	1530	4.97	5	42	1150	4.03	2	59	1030	4.03	3
9	1500	5.89	4	26	1530	4.97	5	43	1150	4.03	2	60	1030	4.04	3
10	1500	5.89	4	27	1530	4.97	5	44	1020	3.14	2	61	1030	4.04	3
11	1500	5.89	4	28	1530	4.97	4	45	1020	3.12	2	62	1030	4.04	3
12	1500	5.89	4	29	1500	4.96	4	46	1020	3.14	2	63	1030	4.05	3
13	1500	5.89	4	30	1280	4.96	5	47	1020	3.14	2	64	1020	3.53	2
14	1500	5.89	4	31	1280	4.93	5	48	1000	3.25	1	65	1020	3.53	2
15	1500	5.89	4	32	1250	4.03	3	49	1280	4.97	5	66	1000	3.25	1
16	1500	5.89	4	33	1250	4.03	3	50	1280	4.97	5	67	1000	3.25	1
17	1500	5.89	4	34	1250	4.02	3	51	1280	4.97	5	68	1000	3.25	1

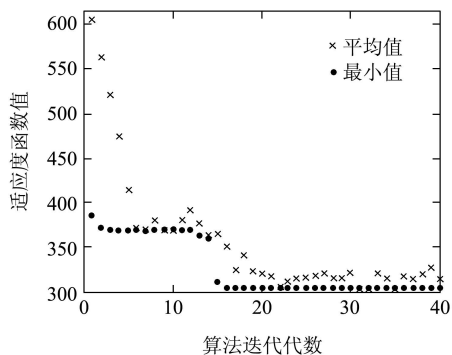


图 1 各代平均值及最小值

Fig. 1 Mean and minimum in generation

6 结论(Conclusion)

本文阐述了热轧轧制计划编制问题, 建立了针对该问题的 MTSP 模型. 并将 MTSP 问题转化为 TSP 问题. 构造了基于遗传算法的改进 Meta-heuristics 算法, 对轧制计划的 TSP 问题进行求解. 该算法采用了单亲遗传的策略. 算法中设计了基于改进的邻域搜索算法的交叉算子, 使算法有较快的收敛速度. 通过利用实际生产数据的进行仿真实验表明, 本文提出的算法切实可行, 编制的轧制计划效果良好.

参考文献(References):

- [1] KOSIBA E D, WRIGHT J R, COBBS A E. Discrete event sequencing as a traveling salesman problem[J]. *Computers in Industry*, 1992, 19(3): 317 – 327.
- [2] TANG L X, LIU J Y, RONG A Y, et al. A multiple travelling salesman problem(MTSP) model for hot rolling scheduling in Baoshan Iron & Steel Complex[J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 124(2): 267 – 282.
- [3] 李耀华, 王伟, 徐乐江, 等. 热轧生产轧制计划模型与算法研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(3): 275 – 279.
(LI Yaohua, WANG Wei, XU Lejiang, et al. Rolling plan model and algorithm in hot rolling plant[J]. *Control and Decision*, 2005, 20(3): 275 – 279.)
- [4] 刘士新, 周山长, 宋健海, 等. 基于PCTSP的热轧单元计划模型与算法[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 89 – 92.
(LIU Shixin, ZHOU Shanchang, SONG Jianhai, et al. Prize collecting traveling salesman problem based model and algorithm for hot strip rolling unit planning[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 89 – 92.)
- [5] BEKTAS T. The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures[J]. *Omega*, 2006, 34(3): 209 – 319.
- [6] GAMBOA D, REGO C, GLOVER F. Data structures and ejection chains for solving large-scale traveling salesman problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 160(1): 154 – 171.
- [7] APPELGATE D, COOK W, ROHE A. Chained Lin-Kernighan for large traveling salesman problems[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2003, 15(1): 82 – 92.
- [8] MEER K. Simulated annealing versus metropolis for a TSP instance[J]. *Information Processing Letters*, 2007, 104(6): 216 – 219.
- [9] CHATTERJEE S, CARRERA C, LYNCH L A. Genetic algorithms and traveling salesman problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 93(3): 490 – 510.
- [10] TAKAHASHI R. Solving the traveling salesman problem through genetic algorithms with changing crossover operators[C] // *Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Applications(ICMLA' 05)*. New York: IEEE, 2005: 319 – 324.

作者简介:

张健欣 (1974—), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为混杂生产过程调度、生产过程智能控制, E-mail: b2005zjx@163.com;

童朝南 (1955—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为生产过程智能控制、自动化技术及计算机仿真、大型过程控制系统集成, E-mail: tcn@ies.ustb.edu.cn.