

文章编号: 1001-0920(2006)10-1138-05

钢铁生产中的加热炉优化调度算法研究

宁树实, 王伟, 刘全利

(大连理工大学 信息与控制研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要: 钢铁生产中的加热炉调度问题属于组合优化中的NP-hard问题。对此,建立了加热炉调度问题的数学规划模型,并提出一种用于求解该问题的超启发式算法——遗传局部搜索算法。基于生产实际数据的仿真实验表明,所提出的方法适用于生产实际,效果优于目前现场使用的人工调度方法。

关键词: 加热炉; 生产调度; 组合优化; 遗传局部搜索算法

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

An Optimal Scheduling Algorithm for Reheating Furnace in Steel Production

NING Shu-shi, WANG Wei, LIU Quan-li

(Research Center of Information and Control, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China Correspondent: NING Shu-shi, E-mail: ningshushi@sohu.com)

Abstract: Scheduling problem of reheating furnace in steel production is a combinatorial optimization problem of NP-hard feature. A mathematical model of furnace scheduling problem is formulated and a metaheuristic algorithm—genetic local search algorithm is presented for solving the problem. A simulation based on practical data shows that the proposed method is better than the method being used in practice and is suitable for practical production.

Key words: Reheating furnace; Production scheduling; Combinatorial optimization; Genetic local search algorithm

1 引言

钢铁生产具有高能耗、高资金占用的特点,加热炉位于钢铁生产中连铸工序和热轧工序之间,是钢铁生产中的高能耗环节。当前,世界能源紧缺,节能降耗已成为钢铁工业发展的目标之一,如何在满足生产工艺的情况下,优化加热炉的生产调度,减少板坯在加热炉中的停留时间,对钢铁生产节能降耗显得尤为重要。

钢铁生产调度长期以来吸引了很多研究者的注意力,特别是对现代钢铁生产中的几道主要工序:炼钢、连铸、热轧的生产调度技术,已经有了很多研究成果^[1,2],主要是采用运筹学方法和智能算法求解其中存在的优化问题^[3-5]。最近又有学者将多代理技术用于钢铁企业的一体化生产计划体系中^[6],主要

考虑了连铸和热轧生产的生产调度问题。近年来,由于加热炉在轧钢生产和热送热装工艺中所处的重要地位,使其成为研究热点之一。有关加热炉的研究大多从热能的角度侧重于加热炉加热优化控制研究,如炉温优化控制、钢坯加热优化控制等^[7],但对于加热炉的生产调度优化的研究相对较少。文献[8]提出一种加热炉的调度策略,但完全没有考虑其后的热轧工序的约束要求,无法在实际生产中得到应用;文献[9]用约束规划的方法解决加热炉中的能量问题,但也不具有普遍性。

加热炉的生产调度是在轧制计划(即板坯出炉的次序)已经确定的前提下决定如何将板坯分配给不同的加热炉进行加热,使得在满足板坯加热温度和热轧要求的情况下,尽量缩短板坯在加热炉中停

收稿日期: 2005-08-22; 修回日期: 2005-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474058); 国家863计划重点课题(2004AA412010)

作者简介: 宁树实(1973—),男,内蒙古赤峰人,博士生,从事生产调度及其优化、智能算法等研究;王伟(1955—),男(满族),辽宁鞍山人,教授,博士生导师,从事自适应控制、模型预测控制等研究

留的时间, 以节约能源、提高产品质量。该问题属于组合优化难题。本文建立了加热炉生产调度问题的数学模型, 提出一种用于求解该问题的优化算法——遗传局部搜索算法, 并用加热炉生产实际数据进行了仿真验证。

2 问题描述

2.1 加热炉生产工艺简介

加热炉位于钢铁生产中连铸工序和热轧工序之间, 其工艺流程如图 1 所示。

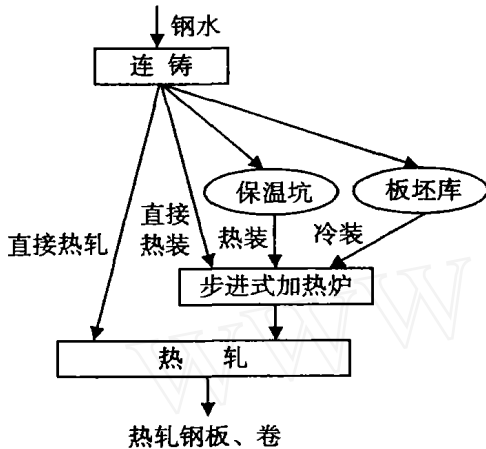


图 1 加热炉生产基本流程

从图 1 可以看出, 连铸与热轧之间的连接有 4 种不同的工艺: 连铸坯直接轧制工艺 (HDR), 连铸坯直接热装工艺 (DHCR), 连铸坯热装工艺 (HCR) 和传统的冷装工艺 (CCR)。这 4 种工艺中只有 HDR 不需要经过加热炉, 但由于 HDR 对设备和生产组织水平的要求过于严格, 在生产中还很少得到应用。CCR, HCR 和 DHCR 这 3 种在生产中常见的工艺都需要将连铸生产的板坯经过加热炉加热后才能进入热轧工序生产。这是由于热轧机对于所加工的板坯温度有一定的要求, 一般要求在 1200 以上, 而由于合同交货期以及工艺规程等要求, 部分板坯必须先放入板坯库中将温度降到室温后再经加热炉加热到轧制温度 (CCR); 有的板坯需要先放入保温坑中然后再经加热炉加热到轧制温度 (HCR); 还有的板坯可以按照从连铸机出来的顺序轧制, 但也需要首先经加热炉加热 (DHCR)。由此可见, 加热炉是热轧前的一道必要工序。

现代钢铁企业中普遍使用的加热设备是连续步进式加热炉, 其能耗大约占整个轧制过程的一半。它是炼钢连铸到轧制生产的中间环节, 为实现均衡连续的轧制生产起着重要的缓冲调节作用。加热炉调度与操作水平的高低直接影响产品的质量、产量、轧机设备寿命和能耗指标以及整个生产线的有效作业

率。连铸坯热送热装工艺的节能降耗和提高生产率的效果最终也体现在加热炉工序的加热过程中。加热炉工作时, 在保证钢材质量的前提下, 希望加热时间越短越好, 这样可以提高加热炉能力, 减少钢材的烧损和脱碳, 防止出现过热、过烧和粘钢的现象。

在现代钢铁企业中, 设备的配备一般是连铸为并行的多台或一机多流的连铸机, 加热炉为多台生产能力各异的加热炉组成的加热炉群, 热轧为一台热轧机。加热炉调度主要应解决如何合理地向各加热炉分配板坯, 使得加热炉生产出来的板坯既能保证供应热轧机生产要求, 又能尽量减少每块板坯在加热炉内的停留时间。

确定加热炉的调度方案时需注意以下工艺要求:

- 1) 加热炉向热轧机提供板坯的顺序必须严格符合轧制计划规定的顺序;
- 2) 一台加热炉可同时加热多块板坯;
- 3) 加热板坯的时间根据板坯的温度 (冷坯、热坯)、重量等不同而不同, 每块板坯都有一个确定的额定加热时间, 板坯在炉内停留时间达到额定加热时间即可认为已经达到要求的轧制温度;
- 4) 板坯加热完成后等待轧制过程中不能在加热炉外停留, 只能在加热炉内保温等待;
- 5) 加热炉的板坯出坯顺序是先进先出; 加热炉的容量有限, 装满板坯的加热炉只有在板坯出炉的情况下才能装入新的板坯;
- 6) 由于热轧机生产能力较大, 停机所造成的损失也大, 所以在加热炉调度时要求轧机停机等待板坯出炉的时间不能过长, 有一定限制。

目前在生产实际中常用的调度方法是按照板坯的轧制顺序依炉号 1[#], 2[#]... 依次向各加热炉分配板坯, 这种调度方法基本能够保证热轧机持续供应板坯的要求, 但不能保证板坯在加热炉内的停留时间最短。通过调度方案的合理化应该能在满足热轧要求的前提下进一步缩短板坯在加热炉内的停留时间。

2.2 数学模型

根据以上描述, 可以建立加热炉调度问题的数学模型。首先定义如下参数:

n 为待加工的板坯的数量;

m 为加热炉的数量;

$S = \{1, 2, \dots, n\}$ 为板坯号集合, S 中元素与待加工的板坯是一一对应的关系;

$Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ 为待加工板坯的要求加工完成的顺序, 其中 q_i 为板坯号, $q_i \in S$, 且 $q_i \neq q_j$ ($i \neq j$);

$t_{ij} (i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\})$ 为板坯 i 分配到第 j 台加热炉加工时所需的额定加工时间;

$s_i (i \in \{1, 2, \dots, n\})$ 为板坯 i 的开始加工时刻;

$e_i (i \in \{1, 2, \dots, n\})$ 为板坯 i 的实际加工完成时刻;

$$p_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果板坯 } i \text{ 分配给加热炉 } j, \\ i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, m\}, \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$$

k_i 为第 i 个加热炉可以同时加工板坯的数量, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$;

h 为轧制一块板坯所用的时间;

C 为热轧机等待加热炉出坯的时间上限值

加热炉调度问题的数学模型可以描述为

$$\min \sum_{i \in S, j \in \{1, 2, \dots, m\}} (e_i - s_i - t_{ij} p_{ij}), \quad (1)$$

$$\text{s.t. } e_i - s_i - \sum_{j \in \{1, 2, \dots, m\}} t_{ij} p_{ij} \geq 0, \quad \forall i \in S; \quad (2)$$

$$e_i > e_j, \text{ 如果 } j > i, \quad \forall q_i, q_j \in Q; \quad (3)$$

$$s_i > s_j, \text{ 如果 } j > i, \quad \forall q_i, q_j \in Q,$$

$$\text{且 } p_{ik} = p_{jk} = 1, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}; \quad (4)$$

$$\sum_{i \in S, j \in \{1, 2, \dots, m\}} p_{ij} = 1; \quad (5)$$

$$e_{q_{i+1}} - e_{q_i} \leq h, \quad \forall q_i, q_{i+1} \in Q; \quad (6)$$

$$\sum_{q_i, q_{i+1} \in Q} (e_{q_{i+1}} - e_{q_i} - h) \leq C. \quad (7)$$

其中: 式(1)表示加热炉调度的优化目标为最小化所有待加热板坯达到轧制温度后在加热炉内停留的总时间; 式(2)保证每块板坯的实际加工时间必须不少于额定加工时间; 式(3)保证板坯从加热炉的出炉顺序与轧制顺序相符; 式(4)保证在同一加热炉中加工的板坯先热轧的先进入加热炉; 式(5)保证每块板坯都被分配而且只被分配到一个加热炉加工; 式(6)保证板坯在热轧机空闲之前一直在加热炉中停留; 式(7)保证热轧机的空闲时间不超过一个预先设定的值

3 算法设计

在加热炉调度问题中, 由于板坯出炉进入热轧的顺序已被严格限定, 相应的板坯在每台加热炉中的加热顺序也必须符合轧制的先后关系, 所以在加热炉调度问题中只要指定如何向各台加热炉分配板坯, 而无须确定板坯在加热炉中的加工顺序. 如果把加热炉看作背包问题中的背包, 板坯看作要装入背包的物品, 则加热炉调度问题就相当于背包容量为无限的多约束背包问题. 多约束背包问题已被证明是NP-hard问题^[10], 这类问题无法用精确算法求得

最优解, 只能通过启发式或超启发式算法得到问题的满意解

遗传算法是较早出现的超启发式算法, 已被许多应用实例证明是求解组合优化难题的有效算法之一. 局部搜索是求解优化问题经常使用的技术, 由于仅仅使用局部搜索只能得到问题的局部最优解, 所以在求取全局最优解的情况下局部搜索的作用受到了限制. 超启发式算法得到成功的应用以来, 局部搜索不仅成为很多超启发算法的重要组成部分, 而且其与超启发式算法结合构成的混合算法也被证明是提高算法效率和性能的有效手段. 本文采用局部搜索与遗传算法相结合的遗传局部搜索算法来求解加热炉调度问题

遗传局部搜索算法利用遗传算法极强的全局搜索能力和局部搜索的深度搜索能力, 实际上相当于在整个解空间内由局部最优解组成的子空间中进行搜索, 搜索的深度和广度比单纯的遗传算法和局部搜索都要好. 遗传局部搜索算法也称为Memetic算法, Cheng等^[11]曾经使用这种算法成功地求解了与加热炉调度问题颇为相似的并行多机调度问题

本文采用的求解加热炉调度问题的遗传局部搜索算法流程为:

Step1: 随机生成 Q 个初始解并以每个解都为局部搜索的起始点找到局部最优解, 形成规模为 Q 的初始种群, 此时初始种群作为当前种群;

Step2: 在当前种群中按照交叉概率 p_c 随机选取执行交叉运算的个体, 两两配对形成一个新个体, 得到的新个体存储于子代种群中;

Step3: 在当前种群中按照变异概率 p_m 随机选取执行变异运算的个体, 执行变异运算后形成新个体, 存储于子代种群中;

Step4: 对子代种群中的每个个体进行局部搜索, 得到的局部最优解取代相应的子代个体;

Step5: 在当前种群和子代种群中通过选择运算选择 Q 个个体形成新一代种群, 并将其作为当前种群;

Step6: 判断是否满足停止条件, 如满足, 算法终止, 输出当前种群中的最优解; 如不满足, 则转Step2

实现遗传局部搜索算法, 除了与遗传算法一样要设计解的编码、遗传算子、选择机制等之外, 还要设计局部搜索所使用的邻域结构

编码 解的编码的功能是将问题的解用一种便于遗传操作的方式表现出来, 本文在求解加热炉调度问题时使用了一个向量表示板坯在各加热炉之间的分配, 在这个向量中包括两类符号——板坯号

和分隔符 板坯号是与待加热板坯一一对应的自然数, 分隔符用于表示结束向当前加热炉分配板坯, 开始向下一个加热炉分配板坯 假设有 9 块待加热的板坯和 3 个加热炉, 一种可能的分配就可以编码为如下的向量:

$$[5\ 8\ 4\ 1\ * \ 3\ 7\ 6\ * \ 2\ 9]$$

根据编码可以看出, 板坯号为 5, 8, 4, 1 的板坯分配给 1 号加热炉, 板坯号为 3, 7, 6 的板坯分配给 2 号加热炉, 板坯号为 2, 9 的板坯分配给 3 号加热炉 由于加热炉加热板坯的顺序是按照“先轧先加热”的原则, 所以分隔符中间的板坯号的顺序并不影响板坯的加工顺序, 在算法的运行过程中也不会注意板坯号的排列顺序, 而只关注板坯向各加热炉的分配

适应度函数 采用式(1)的优化函数目标值的倒数作为适应度函数值

交叉算子 在遗传局部搜索中, 生成新一代的种群时仍要用到交叉算子 本文的交叉算子同时作用于两个染色体(称为父代), 综合这两个父代的特点产生一个新染色体(称为子代) 交叉算子采用了一种“局部方案保留”的策略, 局部方案对应的是某一个加热炉的分配, 通过保留某个父代中的局部方案来保留染色体中比较优良的模式 应用这一交叉算子, 交叉过程中保留了其中一个父代的分配结构和某个局部方案直接遗传给子代, 然后再用另一个父代中的其余板坯号填充子代中的空位置 可以按如下方法分 3 步完成(如图 2 所示):

- 1) 遗传某个父代的分隔符位置给子代;
- 2) 从这个父代随机选择一个局部方案复制给子代;
- 3) 对于没有复制过来的板坯号, 从另一个父代中按照从左至右的顺序复制到子代中

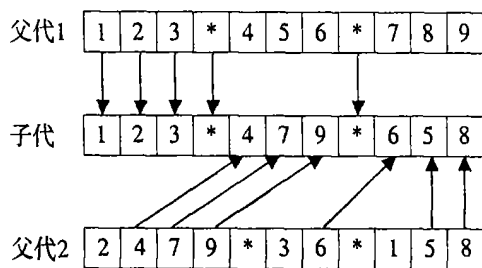


图 2 交叉算子示意图

变异算子 如果遗传操作中只采用交叉算子, 分配给各个加热炉的板坯数量就是一个常数, 显然不能达到全局优化的效果 变异算子在本文算法中起到极大的作用, 本文采用交换式的变异算子, 即在确定要进行变异的父代中随机选取两个位置, 并将这二者的值互换 考虑加热炉调度问题的具体情况, 在进行变异时必须满足如下要求: 所选取的两个位

置不能同属于一个加热炉; 这两个位置的值不能同时为分隔符 事实上, 在本文中所起作用最大的变异算子是所选取的两个位置中有一个而且只有一个为分隔符的情形, 因为只有在这种情况下才有可能改变分隔符的位置, 从而改变向各加热炉分配板坯的数量

选择机制 当前种群经过交叉和变异后生成子代种群, 子代种群再经过局部搜索优化, 然后需要从这两个种群中挑选出新一代种群 本文采用的方法是将精英策略与通用随机采样方法相结合, 首先将这两个种群中适应度值最好的前几个个体直接复制到新一代种群中, 剩余的所有个体再按照通用随机采样方法^[12] 确定是否复制到新一代种群

局部搜索 每得到新一代种群之后都要从其中的每个个体出发进行局部搜索, 得到的局部最优解取代原来的个体在种群中的位置 局部搜索的邻域结构设置为: 随机选取解中的某块板坯, 将其分配给其他的加热炉, 所有可能的放置方式形成的新解组成了该解的一个邻域 局部搜索需要搜索这个邻域中的所有解并保留其中的最优解

停止条件 停止条件设置为算法运行到一个预先设定的迭代次数时停止, 取算法停止时的当前种群中的最优解作为结果输出

4 仿真实验

为了验证本文所提出的加热炉调度的模型与遗传局部搜索算法, 采用生产实际数据进行验证 共选取 10 组数据, 每组数据中的板坯的轧制顺序已经确定, 热轧机的生产能力设为每 2 m in 轧制一块板坯, 共有 3 台加热炉, 每块板坯的额定加热时间已经确定, 冷板坯都在 4~ 6 m in 之间, 热板坯都在 1~ 3 m in 之间 对于每组数据, 用本文算法各运行 50 次, 记录最好结果、最差结果和平均值 仿真结果与人工调度方法的结果同时列于表 1 中

表 1 仿真实验结果

实验数据 (板坯数)	人工调度 方案/m in	遗传局部搜索算法(运行 50 次)		
		最优解/m in	最差解/m in	平均值/m in
67	628	561	565	562.41
108	1 014	923	929	927.9
123	1 380	1 225	1 230	1 228.23
226	2 274	2 018	2 085	2 065.5
151	1 533	1 431	1 438	1 424.78
289	3 131	3 000	3 009	3 003.45
356	3 805	3 649	3 660	3 658.6
311	3 546	3 422	3 468	3 442.68
503	5 351	5 157	5 123	5 134.58
643	6 735	6 371	6 392	6 374.7

算法用 Matlab 语言编写, 运行于使用 Windows 2000 操作系统的 PC 机 (Celeron 1.8G/

256M)上,算法的参数设置为:种群规模为50,迭代次数为400次,交叉概率 $p_c = 0.4$,变异概率 $p_m = 0.4$ 对于10组数据仿真运行时间最长为12min,完全满足现场生产调度的要求

根据表1可以看出:应用本文设计的遗传局部搜索算法求解加热炉调度问题,结果均优于现在正在使用的人工调度方法得到的结果

5 结论

加热炉调度问题是钢铁企业中存在的一类重要的生产调度问题,目前还没有给予充分的研究。本文根据加热炉生产的特点建立了加热炉调度问题的数学模型,并提出了求解这一问题的遗传局部搜索算法。仿真实验表明,本文所提出的生产调度方法比目前生产实际中使用的人工调度方法的效果更好,对于钢铁生产中的节能降耗具有重要的实际意义。

参考文献(References)

- [1] Tang L, Liu J, Rong A, et al. A Review of Planning and Scheduling Systems and Methods for Integrated Steel Production [J]. *European J of Operational Research*, 2001, 133(1): 1-20
- [2] Lee H S, Murthy S S, Haider S W, et al. Primary Production Scheduling at Steelmaking Industries[J]. *IBM J of Research and Development*, 1996, 40(2): 231-252
- [3] Peter Cowling, Wafa Rezig. Integration of Continuous Caster and Hot Strip Mill Planning for Steel Production [J]. *J of Scheduling*, 2000, 3(4): 185-208
- [4] Tang L X, Peter B Luhz, Liu J Y, et al. Steelmaking Process Scheduling Using Lagrangian Relaxation [J]. *Int J of Production Research*, 2001, 40(1): 55-70
- [5] Leo Lopez, Michael W Carter, Michel Gendreau. The Hot Strip Mill Production Scheduling Problem — A Tabu Search Approach [J]. *European J of Operational Research*, 1998, 106(2): 317-335
- [6] Peter Cowling, Djamilia Ouelhadj, Sanja Petrovic. A Multi-agent Architecture for Dynamic Scheduling of Steel Hot Rolling [J]. *J of Intelligent Manufacturing*, 2003, 14(5): 457-470
- [7] 柴天佑, 王中杰, 王伟. 加热炉控制技术的回顾与展望 [J]. *冶金自动化*, 1998, 22(5): 1-5
(Chai T Y, Wang Z J, Wang W. Review and Prospect of Control Techniques for Reheating Furnace [J]. *Metallurgy Automation*, 1998, 22(5): 1-5)
- [8] Clifford Mui, Edmund Oskinski, John A Meech, et al. A SCADA-based Expert System to Provide Delay Strategies for a Steel Billet Reheat Furnace [A]. *Proc of the 2nd Int Conf on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials* [C]. Hawaii, 1999: 111-118
- [9] Paralic J, Malinzak D, Csonto J. Scheduling of Slabs into Push Furnaces — Two Different Approaches [A]. *Proc of the 12th Int Conf on Process Control and Simulation* [C]. Kosice: FBERG Technical University of Kosice, 1996: 355-360
- [10] 玄光男, 程润伟. *遗传算法与工程优化* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 60-63
(Gen Mitsuo, Cheng R W. *Genetic Algorithms and Engineering Optimization* [M]. Beijing: Tsinghua University, 2004: 60-63)
- [11] Cheng R W, Gen Mitsuo. Parallel Machine Scheduling Problems Using Memetic Algorithms [J]. *Int J of Intelligent Automation and Soft Computing*, 1996, 3(2): 273-286
- [12] Baker J. Adaptive Selection Methods for Genetic Algorithms [A]. *Proc of the 2nd Int Conf on Genetic Algorithms* [C]. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1987: 100-111

(上接第1137页)

- [7] Ceri Evans, David Rees, Lee Jones. Periodic Signals for Measuring Nonlinear Volterra Kernels [J]. *IEEE Trans on Instrument and Measurement*, 1996, 45(2): 362-371
- [8] Taylor D, Platts A. Transient Response Testing of Nonlinear Analogue Circuits Using Optimised Fault Sets [J]. *Circuits, Devices and Systems, IEE Proc*, 2003, 150(2): 104-112
- [9] Cesare Alippi, Marcantonio Catelani, Ada Fort, et al. SBT Soft Fault Diagnosis in Analog Electronic Circuits: A Sensitivity-based Approach by Randomized Algorithms [J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(5): 1116-1125
- [10] Ramakanth Kondagunturi, Eugene Bradley, Krisitii Maggard, et al. Benchmark Circuits for Analog and Mixed-signal Testing [A]. *Southeastern '99 Proc of IEEE* [C]. Kentucky, 1999: 217-220