

文章编号: 1001-0920(2011)01-0137-04

炼钢-连铸作业计划的基于仿真的遗传算法

卢克斌¹, 黄可为², 张瑞友¹, 汪定伟¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819; 2. 宝钢技术中心 自动化研究所, 上海 201900)

摘要: 为了改善作业计划的可执行性, 应用基于仿真的优化对炼钢-连铸作业计划问题进行了研究. 借助数学模型描述该问题, 进而开发了一个基于仿真的遗传算法. 该算法能够仿真物理系统的运行和现场人员的部分操作, 简洁明了且运行速度较快. 实验及分析表明, 该方法便于实现, 能得到更接近实际的作业计划.

关键词: 炼钢-连铸; 作业计划; 基于仿真的优化; 遗传算法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

Simulation based genetic algorithm for production planning of steelmaking-continuous casting process

LU Ke-bin¹, HUANG Ke-wei², ZHANG Rui-you¹, WANG Ding-wei¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Institute of Automation, Baosteel Technology Center, Shanghai 201900, China. Correspondent: ZHANG Rui-you, E-mail: zhangruiyou@ise.neu.edu.cn)

Abstract: The job scheduling problem in the steelmaking-continuous casting process is studied by using the simulation based optimization in order to improve the practicality of schedules. The problem is mathematically modeled. Then, a simulation based genetic algorithm is developed to solve the problem, which simulates not only the physical system but also the activities of operators, and is compact and runs relatively fast. Finally, the experiments and analysis show that the developed algorithm can conveniently formulate and the obtained schedules are much practicable.

Key words: steelmaking-continuous casting; production planning; simulation based optimization; genetic algorithm

1 引言

炼钢-连铸作业计划是生产计划中的一个关键问题, 多年来得到了学术界的广泛关注. 一些学者^[1]认为作业计划包括生产能力核定、组炉、组浇、调度等方面, 但本文采用文献[2-3]中狭义作业计划的概念, 侧重研究其中的调度问题. 该问题现有的研究方法包括数学规划方法^[4]、智能优化方法^[2]、基于案例推理的方法^[5]、仿真方法^[3]等. 但由于炼钢-连铸生产的复杂性与不确定性, 这些方法与生产实践的需要有一定差距, 迫切需要新的研究思路.

基于仿真的优化(SBO)是目前十分活跃的研究领域^[6], 其基本思想是, 上层采用优化器对问题求解, 下层采用仿真器对解进行评价, 并将评价信息反馈给优化器指导优化. SBO适用于难以用解析函数描述而

必须采用仿真系统描述的复杂系统, 已成功应用于很多优化问题^[7-9]. 然而, 应用SBO方法的作业计划研究还较少见到.

本文主要基于文献[2]展开研究, 将基于仿真的优化引入炼钢-连铸的作业计划, 开发了一个基于仿真的遗传算法. 实验及分析表明, 该方法便于考虑生产中的不确定因素, 作业计划更接近实际需求, 具有较大潜力.

2 炼钢-连铸作业计划问题

2.1 问题定义与基本假设

炼钢-连铸生产中的作业计划问题是指将各炉次的各工序以适当的顺序安排在适当的工位上, 并在适当的时间组织生产的问题. 该问题可以归结为多任务、多工艺、多机器的混合车间作业调度问题.

收稿日期: 2010-01-04; 修回日期: 2010-05-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70931001, 60821063, 70771021, 71001019); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(N090304012).

作者简介: 卢克斌(1971-), 男, 高级工程师, 博士生, 从事冶金生产计划调度的研究; 汪定伟(1948-), 男, 教授, 博士生导师, 从事建模与优化、生产计划与调度方法等研究.

为了便于描述问题,给出如下基本假设:

假设 1 浇次计划(包括浇次中各炉次在连铸机上的浇铸顺序)已知且不可改变.

假设 2 各工位的最早可用时间已知.

尽管本文结合炼钢-连铸的作业计划描述问题,但该描述方法适用于较多类似的调度问题,具有一定的一般性.

2.2 已知条件

系统中的工序集合为 M , 其中工序 $j \in M$ 包括的并行工位集合为 Q_j . 给定计划期内待安排的炉次集合为 N , 其中炉次 $i \in N$ 的工艺路径 $M_i \subseteq M$ 由该炉次要经过的工序编号构成. 尽管各炉次的工艺路径可能不同,但是最后一道工序相同,均是连铸工序,记为 $j^* \in M$. 初始时刻,工序 $j \in M$ 上工位 $k \in Q_j$ 的最早可用时间为 T_{jk} . 此外,因为某炉次某工序在某工位上的加工时间以及在相邻工序工位之间的运输时间具有不确定性,无法得到这些时间的精确值,只能粗略得到这些时间的期望值等统计信息. 炉次 $i \in N$ 在工序 $j \in M_i$ 的工位 $k \in Q_j$ 上的预期加工时间记为 τ_{ijk} , 炉次 $i \in N$ 在工序 $j \in M_i$ 的工位 $k \in Q_j$ 和其紧后工序 $j' \in M_i$ 的工位 $k' \in Q_{j'}$ 之间的预期运输时间为 $t_{ikk'}$.

2.3 优化目标

为了尽可能准确地描述炼钢-连铸中的作业计划问题,引入决策变量 x_{ijk} 和 y_{ij} , 并借用数学公式描述该问题的目标函数和约束条件. x_{ijk} 为 0-1 型变量,如果炉次 $i \in N$ 的工序 $j \in M_i$ 被分配在工位 $k \in Q_j$ 上加工,则 $x_{ijk} = 1$; 否则 $x_{ijk} = 0$. y_{ij} 为实数,表示炉次 $i \in N$ 的工序 $j \in M_i$ 的开始加工时间.

连铸机组是炼钢-连铸生产中的重要机组,制定作业计划时应尽可能提高连铸机的利用率,进而应尽可能缩短连铸机开浇时刻与该连铸机的最早可开浇时刻之间的间隔. 因此,本文作业计划的目标为极小化连铸机开浇时刻与最早可开浇时刻之间的最大间隔.

在连铸机 k 上浇铸的炉次的集合为 $\{i | x_{ij^*k} = 1, i \in N\}$, 连铸机 k 的预定开浇时刻为

$$\min_{i \in \{i | x_{ij^*k} = 1, i \in N\}} y_{ij^*}.$$

由于连铸机 k 的最早可开浇时刻为 T_{j^*k} , 连铸机的最早可开浇时刻与预定开浇时刻之间的最大间隔为

$$\max_{k \in Q_{j^*}} \left(\min_{i \in \{i | x_{ij^*k} = 1, i \in N\}} y_{ij^*} - T_{j^*k} \right).$$

作业计划的目标函数可以描述为

$$f = \min \max_{k \in Q_{j^*}} \left(\min_{i \in \{i | x_{ij^*k} = 1, i \in N\}} y_{ij^*} - T_{j^*k} \right). \quad (1)$$

2.4 约束条件

首先,炼钢-连铸作业计划应满足一些基本约束条件,这些约束包括:任意工位必须在其最早可用时间之后才能开始作业;同一浇次的各炉次必须在同一连铸机上按给定顺序浇铸;任给合同的任给工序必须在唯一工位上作业,即

$$\sum_{k \in Q_j} x_{ijk} = 1, \forall i \in N, j \in M_i. \quad (2)$$

此外,作业计划还应满足如下一些工艺约束,如:任给工序任给工位上各炉次之间无作业时间冲突、任给连铸机无断浇;给定炉次的相邻工序之间作业时间无冲突,即

$$y_{ij} + \sum_{k \in Q_j} \tau_{ijk} x_{ijk} + \sum_{k' \in Q_{j'}} t_{ikk'} x_{ij'k'} - y_{ij'} \leq 0, \\ \forall i \in N, j \in M_i, j \neq j^*. \quad (3)$$

因为这些约束涉及实际作业时间和运输时间,而这些时间具有不确定性,所以这里只是借助数学描述说明约束的含义,实践中某计划是否可行取决于这些作业时间和约束时间的实际值.

3 基于仿真的遗传算法

炼钢-连铸作业计划包括复杂的工艺约束,生产实践中有大量的不确定因素,因此基于传统的优化方法求解时需要以大量的假设为前提,得到的作业计划通常可实践性较差. 将生产计划付诸实施是评价计划的最好标准,但因为成本太高而不现实. 在实施之前采用仿真的方法进行评价,并将评价结果用于指导优化是切实可行的方法,因此本文采用基于仿真的优化方法研究作业计划问题.

3.1 优化器设计

遗传算法的应用十分广泛,也是常见的基于仿真的优化算法之一^[10],因此本文基于遗传算法开发优化器.

3.1.1 编码与初始解的产生

采用多段顺序编码. 因为浇次信息已知,所以染色体只对各连铸机上浇次的浇铸顺序进行编码,每一段顺序编码对应在一台连铸机上作业的浇次,其他工序上的工位及作业时间等信息根据仿真确定,基于伪随机数随机生成初始解.

3.1.2 交叉算子与变异算子

对于选定的参与交叉的一对双亲染色体,针对其中的每一段顺序编码,采用双切点部分映射交叉. 根据映射关系替换基因之前,先对部分映射关系进行化简,以避免不必要的重复替换. 例如初始部分映射关系“2-5; 4-6; 5-2”可以简化为最终映射关系“4-6”.

对于选定参与变异的染色体, 随机选定一个基因位, 移动到该段基因的最前面.

3.1.3 标定、选择策略与停止准则

采用如下式所示的动态标定:

$$f' = f_{\max} - f + \delta. \quad (4)$$

其中: f 为仿真器返回的目标函数值, f_{\max} 为当代染色体中目标函数的最大值, f' 为标定后的适应值, δ 为事先给定的小常数.

采用扩展的精英保留与正比选择的混合策略. 每一代种群中除最好的个体直接进入下一代外, 最差的个体也直接进入下一代, 其余个体按轮盘赌方式正比选择. 给定最大迭代次数为停止准则.

3.2 仿真器设计

仿真的过程中包括不确定因素, 对于给定的染色体, 重复仿真时可能得到不同的目标值. 为了尽可能消除随机因素的影响, 可对染色体独立仿真多次, 取目标值的平均值返回给优化器.

对于一个解仿真一次的主要步骤如下:

Step 1: 根据各炉次各工序在各工位上的加工时间以及在相邻工序之间的运输时间的期望和方差等信息, 随机生成相应的作业时间和运输时间. 对于正态分布等某些分布规律的随机变量, 一次实现可能得到负值, 但考虑到作业时间和运输时间的物理意义, 将其中的负值调整为零.

Step 2: 基于被仿真的解, 根据连铸机的最早可用时间, 选择未安排工位的可开浇时刻最早的炉次.

Step 3: 对于选定的炉次, 沿给定工艺路径, 从第一工序开始逐一确定工位和开始作业时间, 直至浇铸工序. 当某一工序有多个可用工位时, 优先选择可用时间早的工位.

Step 4: 更新各工序各工位的最早可用时间和已安排的炉次.

Step 5: 如果还有未安排的炉次, 转至 Step 2; 否则, 转至 Step 6.

Step 6: 从连铸机的最后一个浇次开始, 沿逆工序顺序调整各工序的开始加工时间. 对于给定浇次, 如果某炉次开始浇铸之前, 其紧前炉次已经浇铸完毕, 则推迟紧前炉次的开始浇铸时间以避免断浇.

Step 7: 考虑工位的最早可用时间等限制, 调整开始作业时间以尽可能消除工序之间的等待. 对于给定炉次, 如果某工序开始加工之前的某一时刻其紧前工序已经加工结束, 则推迟该紧前工序的开始作业时间.

3.3 算法的特点

相对于传统的遗传算法而言, 本文基于仿真的遗

传算法主要特点在于解的评价方法. 传统的遗传算法可以根据染色体通过解析函数或者一小段程序得到目标函数值, 然而基于仿真的遗传算法中对染色体的评价十分复杂, 而且涉及不确定因素, 需要多次仿真, 根据统计信息来评价. 此外, 基于传统的遗传算法求解作业计划问题需要将各工序的各工位以及作业时间等全部信息描述在染色体中, 因此染色体十分复杂; 而本文基于仿真的遗传算法染色体简洁明了, 便于遗传操作, 而且仿真时便于实现各种不确定因素, 从而使作业计划更贴近生产实践.

相对于很多基于仿真的优化主要仿真物理系统的运行而言, 本文的仿真器有所不同, 不仅包括物理系统的运行, 而且包括现场调度人员的一些活动, 例如加工时间的确定等, 这种方法更适合于相对复杂的系统.

4 实验与分析

应用 Matlab R 2006 B 开发本文算法, 在英特尔双核 CPU (3.00 GHz) 的计算机上运行. 通过对各种不同规模的算例进行测试, 取得了令人满意的结果. 这里只给出源于文献 [2] 的某钢厂某天作业计划的测试情况.

系统中包括 5 台转炉, 4 台 LF 炉, 2 台 RH 炉, 4 台连铸机. 假设在上一道工序的任意工位加工后都可以进入下一道工序的任意工位加工. 当日计划中有 14 个浇次和 121 个炉次, 各浇次的目标连铸机、是否 RH 精炼以及各炉次各工位的作业时间和相邻工序之间运输时间的期望和方差等数据见文献 [2], 假设各工位的最早可用时间为初始时刻 (0:00). 设种群大小为 40, 最大迭代次数为 50, 交叉概率为 0.7, 变异概率为 0.05, 适值标定中的常数 $\delta = 1$. 对每个解仿真的次数为 3.

算法重复运行 3 次, 运行时间均为 243 s, 目标函数值分别为 105, 107 和 103 min, 其中第 3 次运行结果的甘特图如图 1 所示. 图 1 中, 纵坐标自上而下分别为

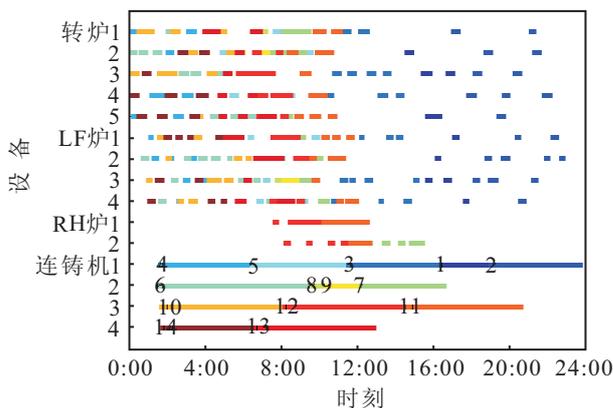


图 1 算例中某次运行结果的甘特图

4个工序上的各个工位,不同的浇次以不同的颜色标注,且在连铸工序中以序号标出。

由图1可见:各连铸机均实现了连浇,工序之间基本没有等待;结果的目标函数值较小,连铸机的利用率较充分;RH炉的利用率较低,这是因为只有很少的炉次包括该工序;算法运行较快,而且便于考虑实践中的不确定因素。

5 结 论

制定高效的作业计划对降低炼钢-连铸的生产成本、提供经济效益具有重要意义。本文提出的制定作业计划基于仿真的遗传算法,便于实现不确定因素,可保证连浇,并尽可能避免工序间等待,使得作业计划更贴近生产实践,而且运行速度较快,为复杂作业计划的制定提供了一条可行的途径。

参考文献(References)

- [1] 胡琨元. 钢铁企业三层结构CIMS中的生产计划方法研究[D]. 沈阳: 东北大学信息科学与工程学院, 2003: 9-10.
(Hu K Y. Research on production planning approaches in iron and steel enterprise based on 3-layer CIMS[D]. Shenyang: College of Information Science and Engineering, Northeastern University, 2003: 9-10.)
- [2] 朱道飞. 钢厂生产作业计划与调度的自组织优化方法研究[D]. 重庆: 重庆大学材料科学与工程学院, 2008.
(Zhu D F. Study on self-organization optimization for production planning and scheduling in steel-making plant[D]. Chongqing: College of Material Science and Engineering, Chongqing University, 2008.)
- [3] 余丽霞, 唐秋华. 炼钢-连铸生产作业计划编制及仿真检验方法研究[J]. 工业控制计算机, 2008, 21(11): 42-44.
(Yu L X, Tang Q H. Establishment of steelmaking-continuous casting production plan and simulation test[J]. Industrial Control Computer, 2008, 21(11): 42-44.)
- [4] Tang L, Liu J, Rong A, et al. A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production[J]. European J of Operational Research, 2000, 120(2): 423-435.
- [5] 常春光, 汪定伟, 胡琨元, 等. 基于两级CBR的钢铁企业动态调度系统研究[J]. 控制与决策, 2004, 19(10): 1109-1112.
(Chang C G, Wang D W, Hu K Y, et al. Research on two stage case-based reasoning for the dynamic scheduling system of iron and steel works[J]. Control and Decision, 2004, 19(10): 1109-1112.)
- [6] Shapiro A. Simulation based optimization[C]. Proc of the 1996 Winter Simulation Conf. California: Institute of Electrical and Electronics, 1996: 332-336.
- [7] Tamaki H, Kitamura S, Murao H. Simulation-based optimization model and meta-heuristic solution of multiple crane scheduling problems[C]. The 2004 IEEE Int Conf Systems, Man and Cybernetics. Hague: IEEE, 2004: 1469-1474.
- [8] Klemmt A, Horn S, Weigert G, et al. Simulation-based optimization vs mathematical programming: A hybrid approach for optimizing scheduling problems[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2009, 25(6): 917-925.
- [9] 李东, 汪定伟. 基于仿真的铁路集装箱装卸策略优化[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(11): 3188-3191.
(Li D, Wang D W. Simulation-based optimization of loading-unloading strategies in railway container terminal[J]. J of System Simulation, 2009, 21(11): 3188-3191.)
- [10] 王凌, 张亮, 郑大钟. 仿真优化研究进展[J]. 控制与决策, 2003, 18(3): 257-262.
(Wang L, Zhang L, Zheng D Z. Advances in simulation optimization[J]. Control and Decision, 2003, 18(3): 257-262.)
- [10] 马国建, 梅强, 杜建国, 等. 一类企业组织竞争中的复杂性表现评价[J]. 管理科学学报, 2008, 11(4): 13-23.
(Ma G J, Mei Q, Du J G, et al. Performance measures of complexity for class of competition of enterprise[J]. J of management sciences in China, 2008, 11(4): 13-23.)
- [11] Pyragas K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback[J]. Physics Letters A, 1992, 170(6): 421-428.

(上接第136页)

《控制与决策》2010年再获佳绩

2010年11月26日,《控制与决策》荣获“百种中国杰出学术期刊”称号,这是本刊自2002~2005年连续4次被评为“百种中国杰出学术期刊”以来,再一次获此称号。

2010年10月28日,《控制与决策》荣获“第三届中国高校精品科技期刊”奖,这是《控制与决策》连续3届获此殊荣。