

炼钢连铸作业计划的混合遗传优化与仿真分析

朱道飞^{1,2}, 郑忠², 高小强²

ZHU Dao-fei^{1,2}, ZHENG Zhong², GAO Xiao-qiang²

1.昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093

2.重庆大学 材料与科学学院, 重庆 400045

1.Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

2.College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China

E-mail: archerzdf@126.com

ZHU Dao-fei, ZHENG Zhong, GAO Xiao-qiang. Hybrid genetic algorithm optimization-based production planning and simulation analysis for steelmaking and continuous casting. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(1): 241-245.

Abstract: Based on procedure networks, a novel optimization model which combines ant colony algorithms and genetic algorithm is proposed to improve the performance and efficiency of production planning for steelmaking-continuous casting process. The production plan is analyzed and evaluated with the simulation model based on cellular automata. The integration of planning optimization model and simulation model provides a useful tool for online evaluating and adjusting production plan, and makes it possible to replan at common disturbances. This integrated system demonstrates ability to deal with time uncertainty in production planning and to set up a conflict-free production plan in simulating cases of a steel company.

Key words: steelmaking-continuous casting; production planning optimization; simulation analysis; genetic algorithm; ant colony algorithm

摘要:为提高炼钢连铸作业计划制定的效率和质量,面向生产工艺流程网络图,建立了一种基于遗传算法与蚁群算法相结合的混合智能优化方法,进行炼钢连铸生产作业计划的编制,并可实现常见扰动情况下的重计划制定;利用基于元胞自动机思想建立的炼钢连铸流程仿真模型,进行生产作业计划的仿真分析和评价。将计划编制模型与仿真模型有机结合,为作业计划的在线动态评价和自动调整提供了一种有效手段。针对某钢厂的仿真实验研究表明:提出的智能优化方法能较好地解决炼钢-连铸生产作业计划的时间不确定性优化问题,可快速生成炉次间作业无冲突的优化生产作业计划。

关键词: 炼钢-连铸; 作业计划优化; 仿真分析; 遗传算法; 蚁群算法

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.01.072 **文章编号:** 1002-8331(2010)01-0241-02 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP278; F273

1 引言

炼钢-连铸作业计划编制是在批量计划的基础上,追求某一评价函数(如最小等待时间、最小总流程时间等)最优情况下,确定各炉次在各生产工序的作业设备和作业时间区间。这是典型的多任务、多工序、多机器的混合车间作业排序问题,是NP难题^[1]。制定合理的炼钢-连铸生产作业计划可以改善钢厂的生产组织方式,有利于整个生产系统协调有序运行。

近年来,随着中国钢铁工业的迅速发展,企业信息化进程的加快,炼钢-连铸作业计划编制问题受到更多关注^[2-4]。通常是在建立生产作业计划编制的数学规划模型^[5]基础上,采用启发式方法^[6]、遗传算法^[7]、蚁群优化算法^[8]以及 Multi-Agent^[9]等方法来求解模型的优化解。但所建数学模型简化的合理性和模型抽象的普适性等直接影响模型的应用效果。一般根据具体流程的

生产作业情况直接抽象得到的网络图呈静态结构^[10],难以表达和体现现实生产作业关系的动态变化;而且,在模型求解中没有考虑生产中加工和运输作业时间的不确定性。从而导致编制的作业计划的可执行性不强,模型在实际生产中的应用情况并不理想。因此,建立能表征炼钢-连铸作业时间不确定性,并能根据流程生产网络动态变化进行作业计划编制、调整和重计划的模型是急需解决的问题。

通过对炼钢-连铸生产流程特征和动态生产环境的分析和抽象,以工序和工位间逻辑关系构建面向生产流程的网络图作为计划制定对象模型,以最小化炉次间的作业冲突时间和尽可能提前安排连铸机的开浇时间为目标函数,以满足连铸机的连浇等工艺要求为约束条件建立作业计划优化模型;提出一种确定炉次在各工序的作业工位以及开始和结束作业时间的蚁群

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2007AA04Z161); 云南省自然科学基金(the Natural Science Foundation of Yunnan Province of China under Grant No.2008ZC007M); 昆明理工大学校人才培养项目。

作者简介: 朱道飞(1979-),男,博士,讲师,研究方向:冶金生产物流仿真与优化;郑忠(1963-),女,教授,博士生导师,研究方向:冶金过程计算机模拟和仿真,冶金过程优化与物流控制;高小强(1963-),男,博士,教授,研究方向:冶金系统工程与信息工程,认知与计算智能等。

收稿日期: 2009-08-19 **修回日期:** 2009-10-09

算法,并将其嵌入优化铸机开浇时间和炉次作业时间的遗传算法形成混合优化算法来求解模型;将作业计划编制模型与基于元胞自动机的流程仿真模型有机结合,进行作业计划的仿真分析,并达到在线计划制定效果评价、调整和重计划编制的目的。最后,以某钢厂的炼钢-连铸作业计划制定实例来验证模型和算法的有效性。

2 炼钢-连铸作业计划编制的智能优化

炼钢-连铸生产是一个离散和连续生产相结合同时存在多种工艺约束的复杂生产过程,而且生产环境具有动态多变性,主要表现在:(1)生产流程的工艺路径变化,如钢厂生产工艺变革,增加或减少生产设备等;(2)钢种加工工艺路径的动态选择;(3)炉次加工和运输时间的不确定性。为此,将炼钢-连铸生产过程抽象成流程网络图,在此基础上构建炼钢-连铸作业计划优化数学模型,并提出基于蚁群算法和遗传算法相结合的作业计划优化方法来高效编制作业计划。

2.1 炼钢-连铸生产流程网络图构架

工位作业和工位间的运输是钢铁生产的基础。生产作业计划通常用各种作业关系构成的网络图形式表示。常规网络图以节点表示作业的开始或结束点、以有向线表示作业活动,体现了生产活动的静态结构特性,能较好地表达小规模、作业任务事先确定的网络结构。但当任务的规模增大时,这种静态的网络图结构的复杂程度急剧增加,且难以表达作业任务发生的不确定性,因此常规网络图显得“刚性有余,柔性不足”,可扩展性不强。

为此,将炼钢-连铸生产涉及的工位、运输线以及完成生产任务的各炉次在工位和运输线上的作业,通过一种简化结构关系的流程网络图来描述和分析。以节点表示炼钢生产流程中的加工工位,节点间的有向线表示钢水在工位间的运输作业,有向线的方向表示钢水的运输方向,可将现实生产流程系统中的加工工序和工位,以及运输路径的逻辑关系直接映射到图中(见图1)。

在网络图的表征方面,采用面向对象的程序开发技术,将工位和运输线封装成不同的类对象,以方便不同钢铁生产企业以组态方式快速搭建符合实际生产流程的以网络图形式表示的对象模型,增强了生产流程网络图的通用性、适应性和可扩展性。

简化的流程网络图被作为炼钢-连铸生产作业计划制定的对象模型。将炉次在工位上的资源占用情况和加工时间等动态绑定到相应工位属性上,炉次在工位间运输的资源占用和作业

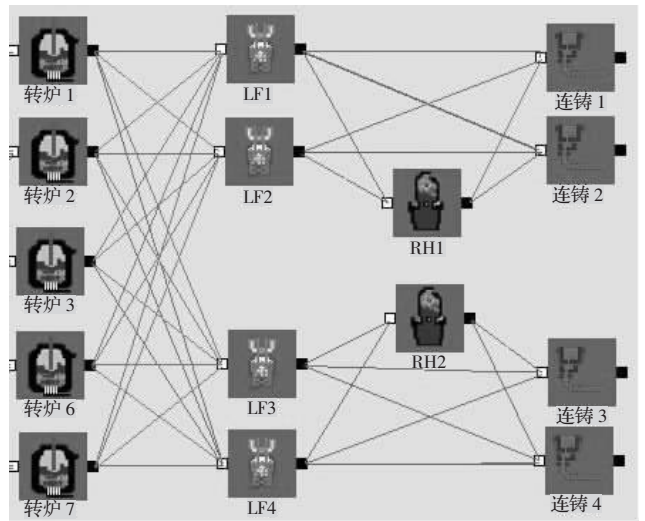


图1 炼钢-连铸生产流程

时间等则动态绑定到相应的连线属性上,以动态适应作业任务的路径选择和时间不确定性情况。

2.2 基于遗传算法的混合优化方法

以网络图对象模型为基础,建立炼钢-连铸作业计划优化模型。模型以工位上炉次间的作业冲突时间和各连铸机中最大可提前开浇时间的加权和最小化为目标函数,考虑的约束条件包括:(1)连铸机的连浇约束;(2)炉次只能在工序中的一个工位上加工作业;(3)炉次在前道工序处理结束后,才能开始下道工序的加工;(4)工位上当前炉次加工结束后才能加工下一炉次;(5)炉次作业前等待时间不超出规定范围;(6)各炉次在工位上作业的开始时刻晚于计划编制的各工位最早可用时刻。

基于遗传算法在嵌入蚁群算法^[1]基础上设计混合优化算法来求解作业计划优化模型,算法原理如图2所示。先由遗传算法生成由各连铸机的预定开始浇注时刻,炉次在工序上的作业时间和工序间的运输时间等信息构成的染色体,并按连浇原则生成各铸机上各浇次内的炉次在连铸机上的开始与结束作业时间,采用蚁群算法确定浇次中所有炉次逆流方向在各工序上的开始和结束作业时间,并选择适宜的加工工位,形成完整的作业时刻表,然后通过遗传算法的适应度函数计算可对当代中所有作业计划方案进行评价和筛选,得到优化方案;再经遗传操作和不断进化,可最终得到满足设定优化效果的模型优化解,即优化的可执行的炼钢-连铸作业计划。

在混合优化算法中,通过生产实绩数据的统计来确定钢种在各工序上加工时间和工序间运输时间的正态分布参数,并将

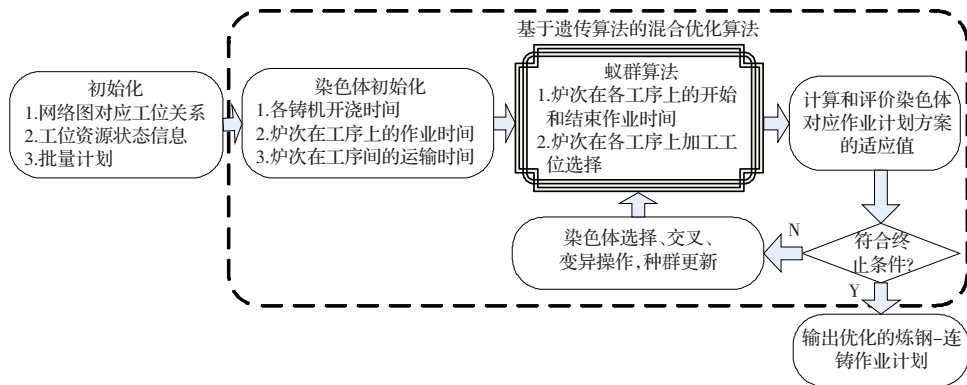


图2 优化算法编制作业计划原理图

各炉次在各工序上的作业时间和工序间的运输时间编码到遗传算法的染色体中, 进行遗传优化。蚁群算法则将炼钢连铸的末道工序后的虚拟节点看成“食物源”, 首道工序前的虚拟节点当成“蚁穴”, 每个炉次当成一个“食物”, 将计划中的所有炉次, 通过与之相应的蚂蚁, 依次从“食物源”经生产工艺流程动态网络的工序和工位, 在相应的时间段内, 根据能综合反映炼钢连铸生产特征(如作业前等待时间最小规则、设备利用率均衡规则等)的工位选择策略, 搬运到“蚁穴”, 从而完成一次作业计划方案的制定。

作业计划优化模型和求解方法能较好地适应动态生产环境的变化。面向对象组态方式搭建的网络图对象模型, 从建模方法层面保证了模型适应生产过程对象和工艺路径变化的要求; 沿流程蚁群算法的动态工位选择规则等从算法机制上可满足生产中工艺路径和设备动态选择的需要; 具有分布特征的加工时间和运输时间描述方法能体现加工和运输时间的不确定性; 基于遗传算法的混合优化方法能满足可执行的优化作业计划制定要求。

3 基于元胞自动机的流程仿真与作业计划的评价和调整

基于元胞自动机思想建立的炼钢连铸流程仿真模型, 可对混合优化算法编制的作业计划进行仿真分析和评价。将仿真模型与作业计划编制模型有机集成, 进行炼钢-连铸生产作业计划的在线动态评价和自动调整。

利用基于元胞自动机的流程仿真模型^[2], 将由编制的作业计划确定的铁水在首道工序的来流节奏以及炉次在各工序的作业时间和在工序间的运输时间, 作为模型的输入条件, 可进行作业计划的仿真运行和分析评价。主要评价指标有: (1) 设备平均利用率; (2) 炉次平均排队等待时间; (3) 平均队长; (4) 物流平均通过时间等。

作业计划制定与流程仿真模型有机集成的系统由仿真模型、作业计划编制模型和模型控制模块三部分组成, 其中模型控制模块的功能是识别生产扰动类型, 并通过检测人工设置的计划编制模型的触发条件来控制计划编制模型和仿真模型的运行。

集成系统的运行原理为: 计划编制模型根据上级下达的生产批量计划、生产系统当前生产快照、网络图对应的生产流程的底层工位关系、生产工艺约束等信息, 生成一个实现连浇的优化炼钢-连铸作业计划, 并将此生产作业计划传送到仿真模型; 仿真模型在以当前生产快照、由作业计划确定的各炉次在

第一道工序的开始作业时间为物流来流节奏的输入条件下, 考虑作业任务在各工序间运输时间和在工位上作业时间的分布规律, 按作业计划中所选择的工位为仿真的目标工位, 在仿真运行时优先选择此目标工位完成作业, 当目标工位不能按时加工当前任务时, 启用原仿真模型的工位选择规则, 选择其他适合的工位来加工, 以进行作业计划的仿真运行, 仿真结果和仿真目标数据将被传送给模型控制模块; 模型控制模块比较仿真结果和作业计划数据, 当仿真模型中任务的作业工位与作业计划中的目标工位不同或者有系统扰动因素(如设备故障、改钢、返钢等)发生时, 模型控制模块将仿真模型的当前快照信息及扰动信息发送给计划编制模型, 进行重计划编制, 并将调整后的作业计划结果更新到仿真的目标数据库中, 来指导流程仿真。

在仿真周期内, 以上过程循环进行, 形成计划制定-仿真信息反馈-计划调整的闭环系统, 使系统能进行计划的在线评价与调整。集成系统各模型间的数据流图如图 3 所示。

4 实例与分析

针对某钢厂炼钢转炉至连铸的生产工艺流程, 建立如图 1 所示的炼钢-连铸对象模型网络图, 进行作业计划编制和仿真实验, 并与钢厂的生产实绩数据对比分析, 检验算法和模型系统。

以某天 8 小时的浇次计划(8 浇次, 54 炉次)、钢种工艺路径(不同钢种的工艺路径不同)、钢种在工序上作业时间和工序间运输时间的分布规律等为输入条件, 算法中设置种群规模为 40, 交叉概率为 0.95, 变异概率为 0.05, 在 CPU 为 P4 2.8 GHz, 1 GB 内存的台式机上, 进行多次实验, 基于遗传算法和蚁群算法的混合优化方法均在 50 秒内得到优化的生产作业计划(如图 4 所示)。钢水出炉到开始浇注过程中各炉次的物流节奏时间比较如图 5 所示。

以混合优化算法编制的作业计划在首道工序上的开始作业时刻为仿真模型的物流进入时间节奏, 进行多次仿真实验, 统计得到各设备的平均利用率如图 5 所示, 图 6 为各炉次出钢至开浇的平均物流时间。

综合图 4、图 5 可以看出, 混合优化算法得到的各连铸机的开浇时刻合理, 在实现完全连续浇注的情况下, 各炉次间无作业时间冲突, 设备利用率均衡。由图 5、图 6 表明混合优化算法编制的作业计划与元胞自动机流程仿真模型得到的设备平均利用率以及炉次的平均物流时间差别较少, 这说明编制的炼钢-连铸生产作业计划在现实生产中具有较高的可执行性。

从图 6 可以看出, 按优化算法得到的炉次出钢至开浇的平

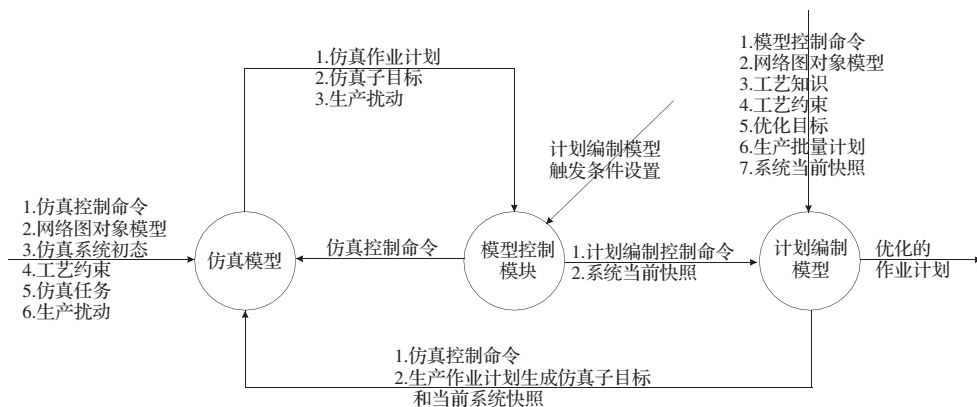


图 3 集成系统中各模块的数据流

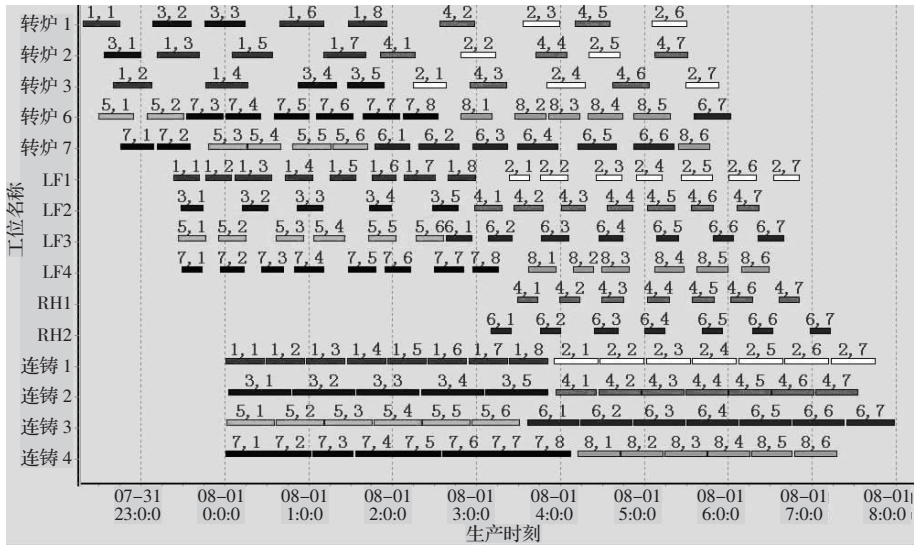


图4 混合遗传算法编制的作业计划

注:甘特图中各炉次上方数字分别表示浇次号和炉次在浇次内的作业序号。

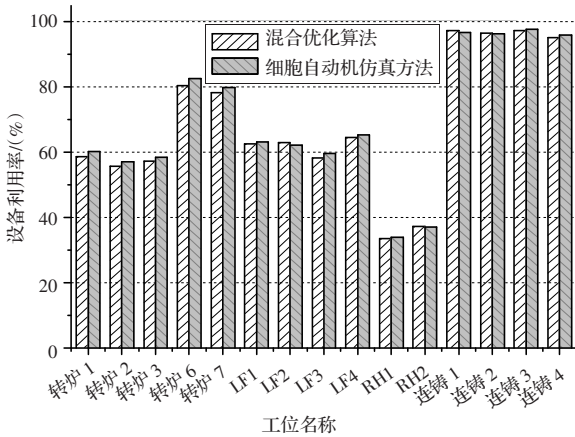


图5 设备平均利用率

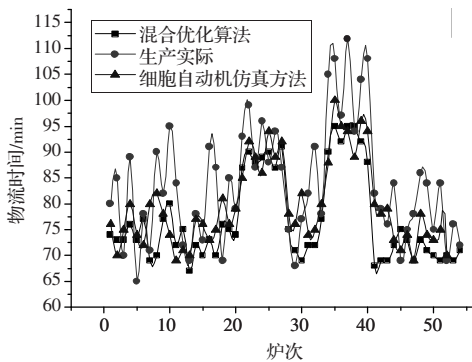


图6 出钢至开浇物流时间比较

均物流时间比生产实绩缩短 5%左右,有利于生产运作效率的提高;且各炉次的物流时间的波动幅度明显低于生产实绩数据,有利于各工序协调平稳地组织生产。

在图 4 对应的作业计划仿真过程中,设置生产扰动为 1:15 到 8:00 转炉 6 因故障进行维修,系统检测到此扰动信息后,仿真模型将扰动信息传送给模型控制模块,模型控制模块中断仿真过程,并将 1:15 时刻系统对应的快照及扰动信息发送给计划编制模块,启动计划编制模块进行重计划编制,再由调整后的作业计划结果生成仿真子目标,将其与当前系统快照传送到仿真模型,再启动仿真模型继续仿真。最后得到图 7 所示的生

产扰动下的作业计划。

对比图 4、图 7 可看出,由于转炉 6 的故障,打乱了正常情况下系统中 1#、2#、3# 转炉出钢的钢水只供给 1# 和 2# 连铸机浇注的规律,它们还需向 3# 和 4# 连铸机供应钢水,且由于钢水从 1#、2# 和 3# 转炉送往 3# 和 4# 连铸机需绕行,实验结果反映出其对应炉次的平均物流时间增加 2%左右。因此,集成后的系统能处理实际生产中常见的随机扰动事件,并能根据扰动进行作业计划的在线调整。

5 结论

根据生产流程中工序工位的逻辑关系建立简化的流程网络图,用于灵活表达完成生产任务的工位作业和工位间的运输作业。面向对象建模方法搭建的网络图可作为计划编制模型的对象模型,实现各种对象属性和模型算法的动态绑定,可增强作业计划编制方法的通用性和可扩展性。

在基于遗传算法和蚁群算法相结合的混合优化方法的作业计划编制时,将炉次在工序间的运输时间和在工序上的作业时间编码到遗传算法的染色体中,能实现对时间不确定性的表达;蚁群算法可实现“连浇”条件下的作业计划编制,混合优化算法能制定出无作业时间冲突的优化的炼钢-连铸作业计划。

基于元胞自动机的生产流程仿真模型可对已生成的作业计划进行多指标的仿真分析和评价,且将其与作业计划编制模块进行系统集成后,能满足系统在线制定和调整生产作业计划的要求。

炼钢-连铸作业计划编制的仿真实验与生产实绩数据的对比结果表明:混合优化算法能快速编制出合理、可执行的作业计划,且各生产环节的作业波动幅度较小,更有利于生产组织,实现各工序的协调生产。

致谢 感谢“863”项目、云南省自然科学基金、攀钢(集团)公司和四川托日信息工程公司有关部门和人员在项目工作中给予的大力支持和帮助。

参考文献:

[1] Neron E, Baptiste P, Gupta J N D. Solving hybrid flow shop problem using energetic reasoning and global operations [J]. Omega, 2008, 36(4): 385-395.

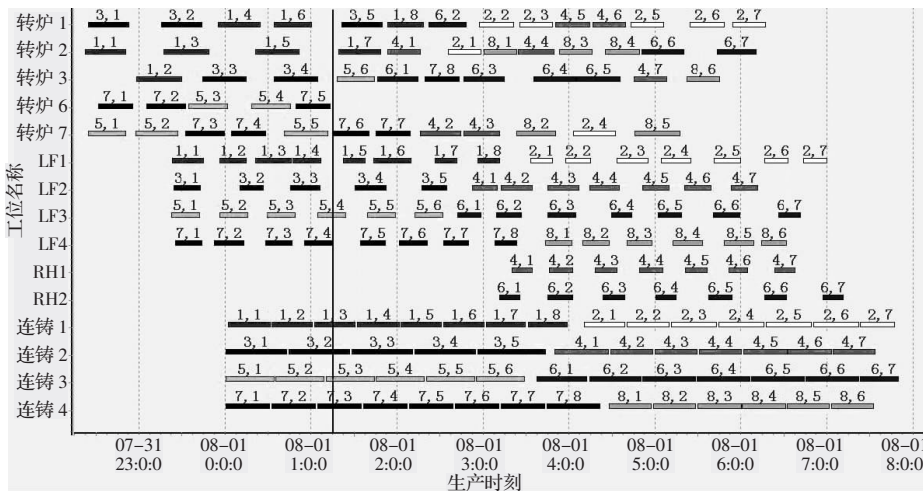


图7 集成系统编制扰动情况下的作业计划及计划调整

注: 甘特图中所标竖线为重计划编制时刻。

2001, 29(6):501-511.

[2] 崔志华, 高慧敏, 曾建潮. 一种求解连铸生产调度问题的非线性遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(35):205-207.

[3] Tang L, Liu J, Rong A, et al. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 133(1):1-20.

[4] 常春光, 胡琨元, 汪定伟, 等. 钢铁生产动态调度理论研究与应用综述[J]. 信息与控制, 2001, 133(1):1-20.

[5] Tang L, Liu J, Rong A, et al. A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 120(2):423-435.

[6] 常俊林, 郭西进, 马小平. 并行机组调度问题的启发式算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(4):234-236.

[7] Santos C A, Spim J A, Garcia A. Mathematical modeling and optimization strategies (genetic algorithm and knowledge base) applied

to the continuous casting of steel[J]. Engineering Application of Artificial Intelligence, 2003, 16(8):511-527.

[8] Leng S, Wei X B, Zhang W Y. Improved Aco scheduling algorithm based on flexible process[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 23(2):154-160.

[9] Mohanty P P. An agent-oriented approach to resolve the production planning complexities for a modern steel manufacturing system[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2004, 24(3/4):199-205.

[10] Pacciarelli D, Pranzo M. Production scheduling in a steelmaking-continuous casting plant[J]. Computers and Chemical Engineering, 2004, 28(12):2823-2835.

[11] 郑忠, 朱道飞, 高小强. 基于蚁群算法的炼钢-连铸作业计划编制方法[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(4):504-510.

[12] 郑忠, 何腊梅, 高小强. 炼钢生产物流系统仿真的细胞自动机模型[J]. 钢铁, 2004, 39(11):75-78.

(上接 217 页)

表6 动态规划方法调度方案

可见时间窗口	安排任务	开始时间	结束时间
1	a_2	14:39:02.17	14:42:02.17
	a_5	14:43:42.17	14:51:42.17
	a_8	14:53:22.17	14:55:22.17
2	a_9	15:33:43.62	15:53:43.62
	a_1	17:22:15.38	17:27:15.38
3	a_{10}	17:28:55.38	17:52:55.38

表7 算法结果分析

参数	动态规划方法	禁忌搜索算法	
时间窗口占用率/(%)	1	72.11	86.82
	2	77.84	96.00
	3	82.20	96.81
时间窗口总利用率/(%)	78.18	93.90	
任务完成率/(%)	75.00	87.50	

该算法在解决卫星任务调度方面比动态规划方法更优。

4 结论

卫星任务调度问题是一类最重要的组合优化问题。针对卫

星任务调度问题, 在卫星对地面站的时间窗口和任务执行时间的约束条件之上, 考虑任务的优先级 c_j 和任务的转换时间 s_{jk} , 以完成任务的优先级之和最大为目标, 建立了带有时间窗口约束的任务调度模型, 应用禁忌搜索算法近似地求得卫星最优任务调度方案, 提供了一种求解该类问题新的方法。实际应用中, 卫星任务调度问题的约束条件非常复杂, 如任务的资源消耗、数据的存储与下传等等, 这有待于进一步的探索和研究。

参考文献:

[1] 刘洋, 陈英武, 谭跃进. 基于贪婪算法的卫星地面站任务规划方法[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(10):12-39.

[2] 刘洋, 陈英武, 谭跃进. 卫星地面站系统任务调度的动态规划方法[J]. 中国空间科学技术, 2005(1).

[3] Tan K C, Lee L H, Zhu Q L, et al. Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 2000, 15.

[4] Glover F, Laguna M. Tabu search[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997:6-14.

[5] Bräysy O, Gendreau M. Vehicle routing problem with time windows, part II: Metaheuristics[J]. Transportation Science, 2005, 39(1):119-124.