

文章编号:1000-582X(2010)03-108-06

炼钢-连铸生产计划调度一体化的仿真优化模型

郑忠^a, 刘海玉^a, 高小强^b, 何腊梅^a, 张涛^a, 陈开^a

(重庆大学 a. 材料科学与工程学院; b. 经济与工商管理学院, 重庆 400044)

摘要:为解决炼钢-连铸生产计划制定的可执行性与调度过程的时间不确定性影响问题,建立了一种计划调度一体化的仿真优化模型。模型以炼钢生产流程中的物流为对象,将连铸的连浇批量计划完成作为仿真的目标导向,同时考虑了过程的实时信息,并将生产调度原则抽象作为仿真模型的局域演化规则;模型可根据生产目标、过程信息按局域规则进行工位状态更新和物流迁移,从而实现目标导向下的自组织仿真。对于任意设定的时间范围,通过仿真模型的一次连续演化即得到可执行的炼钢-连铸炉次计划,即初始调度方案。以某钢厂 8h 的生产实际数据检验了该仿真优化方法的有效性。

关键词:炼钢;连铸;物流;生产计划;调度;计算机仿真

中图分类号:TP399;TH166

文献标志码:A

Optimal model on integrated production planning and scheduling of steelmaking and continuous casting process

ZHENG Zhong^a, LIU Hai-yu^a, GAO Xiao-qiang^b, HE La-mei^a, ZHANG Tao^a, CHEN Kai^a

(a. School of Materials Science & Engineering; b. School of Economics &

Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Considering the uncertainty and complexity of production planning and scheduling in steel-making and continuous casting, an optimal simulation model is built. Based on the analysis of the logistics in steelmaking process, the casting plan is regarded as the global goal, and the procedural information is taken into account, as well as the local evolution rule that abstracted from scheduling rule. To simulate transferring of materials in the process, the state of operation sites are updated as a result of the global goals, process information and local rule. The goal-directed simulation is carried out based on the self-organization evolution mechanism. Finally, an optimal integrated production plan is made by a continuous simulation evolution. A simulation case for eight hours production plan shows that the model is valid and efficient.

Key words: steelmaking; continuous casting; material flow; production planning; scheduling; computer simulation

炼钢-连铸生产是钢铁生产的关键环节,其生产管理的核心是制定合理的生产作业计划并通过调度

实施,然而炼钢生产系统是一个多目标、多层次、非线性、动态有序的复杂系统^[1],其生产计划与调度是

收稿日期:2009-10-27

基金项目:国家 863 计划资助项目(2007AA04Z161);国家自然科学基金项目(50574110)

作者简介:郑忠(1963-),女,重庆大学教授,博士生导师,主要从事钢铁生产流程优化研究,(Tel)023-65111651,
(E-mail)zhengzh@cqu.edu.cn.

具有不确定性的 NP 难题^[2]。因此,寻求有效制定炼钢-连铸生产作业计划并实施的方法具有重要意义。

炼钢-连铸生产计划与调度问题是近年冶金先进制造领域的研究热点^[3-6]。文献[7]通过 Alternative 图模型描述炼钢-连铸问题,在考虑调度问题的约束条件后,采用 Beam 搜索算法解决生产作业计划与调度问题。文献[8]建立炼钢-连铸生产调度数学规划模型并采用拉格朗日松弛法求解,能得到合理的作业计划。文献[9]采用一系列启发式算法得到粗调度,以总完成时间最短和工序间等待时间最小为优化目标,利用线性规划对粗调度进行优化。文献[10]建立炼钢-连铸混合流水车间调度模型,利用工序和工件混合编码的改良遗传算法编制作业计划,提高了作业排序的精度和效率。但目前关于炼钢-连铸计划调度问题研究中,一般均未考虑生产过程中存在的时间不确定等因素的影响,难以明确作业计划是否具有可执行性,因此制定的作业计划只是作为生产调度的参考^[4,6,11]。

仿真方法既能揭示生产物流的规律,又能避开直接对炼钢-连铸计划调度难题进行理论分析的困难^[12],因此笔者将基于仿真方法从计划的可执行角度来进行炼钢-连铸生产计划调度一体化的模型研究。建立以连铸的连浇批量计划为目标导向的仿真优化模型,将生产调度原则转换为仿真模型的局域自组织演化规则,模型中物流对象在各工位和运输路径上的时间是根据现实生产的各相应时间统计分布中随机选取;模型在目标导向作用下,可实时综合考虑模拟对象系统的全局和局部工位状态信息的影响,通过规则的决策确定模型演化的局域规则并进行仿真运行;模型经过一次连续仿真即可制定出任

意设定时间范围的可执行的炼钢-连铸生产作业计划,也即初始调度方案;最后以某钢厂的炼钢-连铸作业计划制定实例来验证模型的有效性。

1 仿真优化方法

1.1 问题描述

炼钢-连铸一体化计划调度的关键在于生产作业计划中应考虑调度要素以使计划可实施,重点在于生产物流的合理运行,包含生产计划与控制^[13]。计划是为生产制定目标和要求,控制是为了达到目标,根据生产情况对计划的调整,也即调度。在炼钢-连铸生产中存在以下不确定因素:工艺路径与工位选择可调整、物流在工位与运输路径的时间具有分布特征等。

因此,面向生产物流的计划调度一体化仿真优化方法,需以连铸的浇次批量计划的完成为目标、以保证连铸机在生产周期内最大可能连续浇铸、以炉次为对象的物流在各工位无冲突且等待时间尽可能短的条件下,来实现生产物流的仿真运行。仿真演化规则是物流运行的关键,目标导向作用与规则有效决策下的自组织仿真是实现仿真优化、得到可执行的生产作业计划及初始调度方案的保证。

1.2 仿真模型

首先基于炼钢-连铸生产工艺布局与生产流程建立能描述生产物流(钢水)运行的对象模型,用具有组态功能的简化网络图及其变化方式构建对象模型,该建模方法具有良好的适应性与可扩展性。

在仿真优化模型中有 3 个关键要素:目标、信息和规则。模型要素与实际生产间的关系如表 1 所示。

表 1 实际炼钢-连铸生产过程与仿真模型对应表

项目	仿真优化模型	实际炼钢-连铸生产过程
目标	全局目标	铸机的浇次计划(浇次内炉数、各炉次开浇时刻)
	局部目标	各物流(炉次)在各道生产工序上的作业时间
信息	全局信息	连铸机生产节奏相关信息
	局部信息	工序/工位、连线上物流作业的状态信息
规则	全局规则	连铸机生产节奏控制规则
	局部规则	基于车间作业调度规则的模型中工位与连线的状态转变规则

图 1 给出了仿真优化模型原理及一体化计划调度方案的制定过程,实现炼钢-连铸生产一体化计划调度的核心是在仿真过程中进行目标、信息以及规

则的有机结合,在目标导向作用下、考虑实时信息的影响,通过规则的决策来启用适宜的局域规则,实现模型的自组织仿真演化。

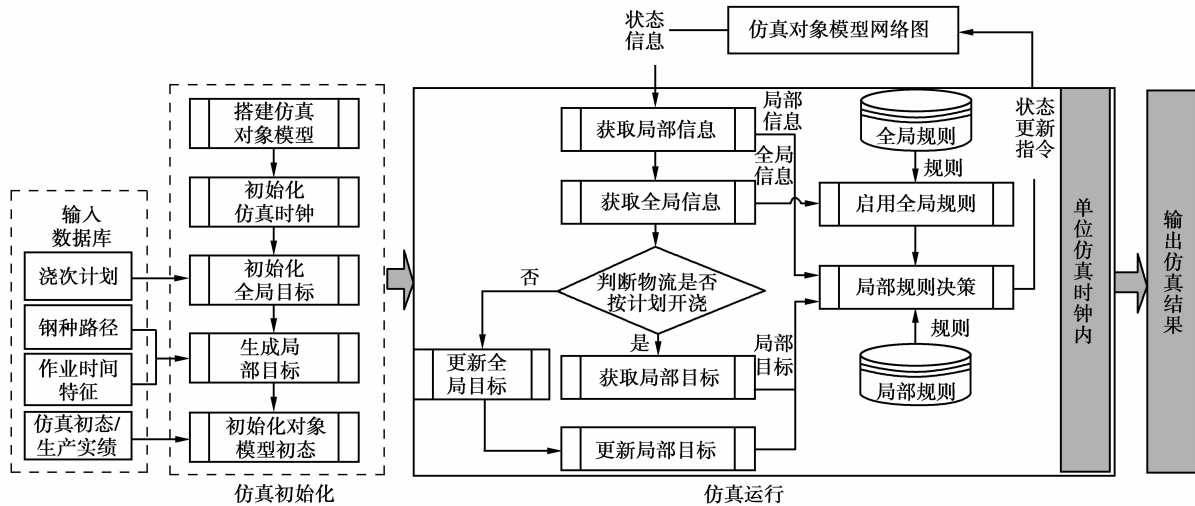


图 1 基于仿真的炼钢-连铸生产作业计划优化原理

2 关键技术

2.1 全局目标与局部目标

2.1.1 全局目标与局部目标的生成

炼钢-连铸过程的全局目标与局部目标,为仿真演化过程中物流在各工序工位的作业提供了一个进行生产节奏控制的目标作业时刻。全局目标对应于连铸生产的连浇要求,对各个连铸机可计算如下:

$$X_{ij} = \begin{cases} T + (j-1) \times \Delta T, & i = 1, \\ X_{(i-1)j} + \Delta t + (j-1) \times \Delta T, & i > 1. \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_{ij} 为铸机上的浇次 i 中第 j 个物流(炉次)的开浇时刻; T 为铸机预计开浇时刻; ΔT 、 Δt 分别代表当前铸机的浇铸周期、浇次间铸机的准备时间。

局部目标是根据全局目标中各物流(炉次)的开浇时刻和浇次内物流(炉次)的数量以及物流的生产工艺(炉次的钢种要求)为基础,采用时间倒推方法^[14]得到。为了描述物流在加工和运输中的时间不确定性,将物流在各工序及运输线上的正常作业或运输时间分布考虑成均值和方差或最大值和最小值,并根据物流的工艺路径,按逆流程方向由铸机工序开始依次倒推出物流在各个工序上的参考生产作业时间,包括最早开始时间、最晚开始时间、最早结束时间以及最晚结束时间组成,分别表示为 EarliestBegin、LastestBegin、EarliestEnd、LastestEnd。

2.1.2 全局目标与局部目标的更新

物流的仿真过程是顺流程方向进行,在仿真运行过程中,由于各工位及运输作业时间的随机性,物流很可能不按全局目标中设定的时间开浇,对于各浇次中的某个物流,若出现未按全局目标到达铸

机的情况时,需区别对待,若该物流是浇次第一炉次物流,则以其实际到达时刻作为开浇时刻,否则调整当前浇铸周期,进行全局目标更新;并将该物流引起全局目标偏差作用于该浇次内的其他物流,进行局部目标更新,以保证从时间角度来满足当前铸机连续浇铸。即若模型中以铸机当前物流开浇时刻与其对应的全局目标中的开浇时刻的差值 $\Delta T'$ 为偏差值,则对于该铸机上其他待浇物流所对应的全局目标需在原基础上增加 $\Delta T'$, 同样铸机其他待浇物流在其未加工工序上的局部目标也应相应增加 $\Delta T'$ 。

2.2 局部信息、全局信息和全局规则

2.2.1 局部信息与全局信息

在仿真演化过程中,实时收集仿真对象模型中各工序/工位及其衔接运输环节对应连线的状态信息,作为物流在模型中演化的局部信息。而全局信息则与全局目标相对应,包括各铸机上各浇次内炉次的物流信息包括钢种属性等,并据此在演化过程中对各浇次内的物流信息进行跟踪,以反映全局目标的执行情况。

2.2.2 全局规则

全局规则是在全局信息基础上通过统计各浇次执行过程中的物流数量(即炉次或钢水在线量)来确定铸机生产节奏的规则。各个浇次在生产过程中若同时满足以下 2 个条件:1) 流向铸机当前浇次的物流数量少于该浇次剩余物流数量;2) 流向铸机当前浇次的物流量小于转炉至铸机之间平均生产物流时间内铸机浇铸物流量,则由全局规则判定该浇次生产节奏紧张,否则该浇次生产节奏正常。全局规则将影响物流运行时局部规则的选取。

2.3 局部规则与仿真演化

2.3.1 局部规则

局部规则是仿真演化过程中工位及运输线状态变化的依据,是驱动模型中物流迁移的动力,

反映了实际物流的运行特征。根据炼钢-连铸生产计划调度的特点,将生产组织和调度原则抽象为仿真优化模型的局部规则,具体规则如表 2-7 所示。

表 2 局部作业规则表

规则名称	规则描述	规则作用	主要影响因素
择路规则	$R_{selRoute}$	确定物流下步作业工位	工艺路径、工位状态
作业时间规则	R_{Time}	确定工位/运输线作业时间	钢种、局部目标
优先级规则	$R_{Priority}$	确定任务优先作业顺序	物流对应浇次的生产节奏
设备扰动规则	R_{Fail}	置设备状态为“不可用”	设备状态、设备检修时间

2.3.2 局部规则的决策

规则的决策主要用于局部规则的启用。在择路规则中包括了最小等待时间、设备利用均衡以及随机选择等规则。物流生产节奏的全局规则将影响作业时间规则和任务优先级规则的决策。作业时间规则用于确定工位或运输线接受物流时的作业或运输时间的选择原则,将工位或运输作业时间分布按该对应物流类别得到的统计分布区间分为最大、最小、正常作业时间 3 部分,作业时间的选择依据当前仿真时刻与发生迁移物流在对应工序/工位上的局部目标及生产节奏紧张与否来决定其取值范围,如图 2 所示,并且节奏紧张时的物流作业有相对高的任务优先级。

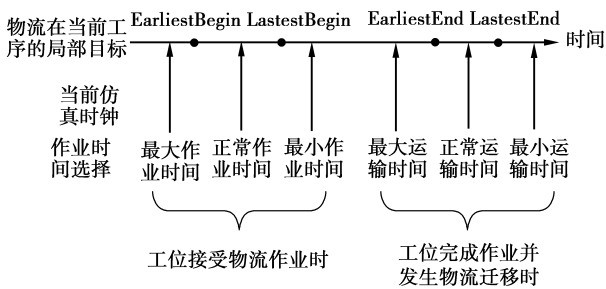


图 2 作业时间规则确定示意图

2.3.3 仿真模型的演化过程

仿真模型的优化运行由 2 个重要环节组成,一是将生产物流的仿真目标通常将浇次计划作为物流沿流程运行的全局目标,对物流仿真运行起导向作用,全局目标可以根据生产物流沿流程反演分解为局部目标;二是物流在沿流程方向的仿真演化过程中,需适时在依据全局信息所确定的全局规则的控制下,根据当前时刻的局部信息按局部演化规则进行演化,对物流动态网络的状态更新。仿真过程的

主要算法如下。

```

Step1 Establish Object-Oriented Model
for Simulation
    IF IsExistModel THEN
        ReadModel
    ELSE
        CreateModel
    END
Step2 Init Parameters of Simulation Model
    GetModelPara
    GetSimTask
    InitModelState
    EvaluateModelPara
    CreateGlobalAim
    CreateLocalAim
Step3 Run Simulation Model
    T=1
    LOOP1:
        GetModelState
        ChooseLocalRule
        ChooseMoveDes
        UpdateAllModelState
        UpdateGlobalAim
        UpdateLocalAim
        T=T+1
        IF NOT IsTaskFinished THEN
            GOTO LOOP1
        END IF
Step4 Evaluate and Show Simulation Result
    EvaluateSimResult
    ShowSimResult

```

3 应用实例

以某钢厂的转炉至连铸机生产工艺流程和生
产作业实绩为应用背景,进行仿真优化模型检验和比
较分析。图 3 为采用动态网络图搭建的该厂生产流
程的仿真对象模型。选择该厂某日早班 8 h 的浇次
生产计划(如表 3 所示)作为验证模型正确性与可行
性的标准。在 CPU 为奔腾 2.8 G,内存为 512 M 的
台式机上按照笔者提出的优化方法进行仿真实验,
在 3 min 内能够完成仿真并得到优化的生产作业计
划。图 4、5 分别显示了仿真优化方法制定的生产作
业计划及生产实绩对应的作业计划,图 6 则给出了
各浇次的物流按序号由转炉出钢至开始浇铸的仿真
作业时间与实绩作业时间的比较。

表 3 某厂 8 h 浇次计划表

浇次号	钢种	炉数	铸机	精炼方式	备注
1	St12	5	板坯 1	LF	上班剩余
2	Q235B	6	板坯 1	LF	新增浇次
3	DX52D+Z	9	板坯 2	LF	新增浇次
4	U75V	12	方坯 1	LF+RH	上班剩余
5	36Mn2V	8	方坯 2	LF+RH	新增浇次

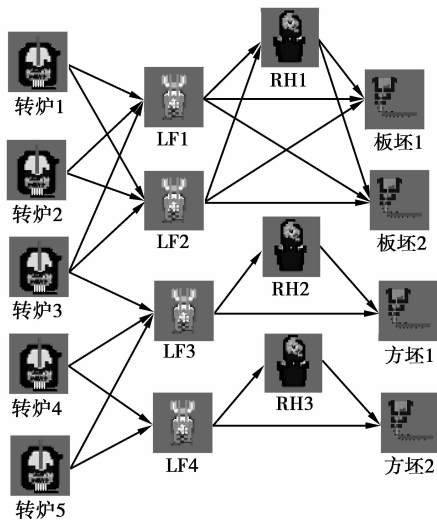
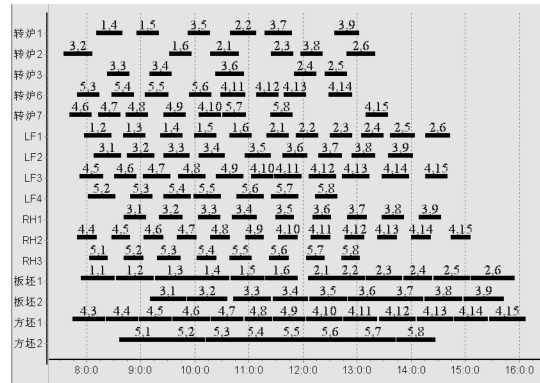


图 3 某厂炼钢-连铸生产流程图

仿真实验表明:建立的仿真优化模型,通过一次
仿真即可编制出设定时间范围的优化的生产作业计
划。该生产作业计划在实现连续浇铸的情况下,各
个炉次在工位上无作业冲突,设备利用率均衡。如
图 6 所示,生产实绩的各物流由出钢至开始浇铸过
程的通过时间波动比较大,物流运行总时间为



说明:甘特图中各物流上方数字分别表示浇次号和物流在浇次内的作业序号。

图 4 仿真优化编制的生产作业计划

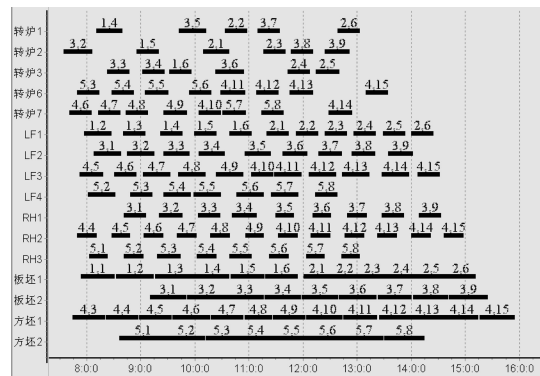


图 5 生产实绩对应的作业计划

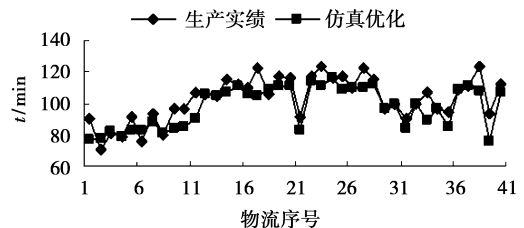


图 6 各物流出钢至开始浇铸的作业时间比较

4 110 min;而经过仿真优化得到的平均物流时间为
80 min 左右(不经过 RH 精炼)和 105 min 左右(经
过 RH 精炼);物流运行总时间为 3 906 min,较实绩
缩短 5%。实例结果表明,该仿真优化方法是有效
的。

4 结 语

建立的基于目标导向与自组织演化有机结合的
仿真优化模型可有效解决炼钢-连铸一体化计划调
度问题。通过将实际炼钢-连铸生产工艺流程布局
和物流运行抽象表征为仿真对象模型的网络图,构
建以生产浇次计划为仿真优化模型的全局目标导

向,将全局目标分解为局部目标,将生产调度原则转换为仿真模型的演化规则,并在模型中考虑实时信息的影响、通过信息和目标影响规则的决策,从而实现模型的自组织仿真演化。模型可对设定的任意时间范围的生产批量计划(浇次计划),经过一次仿真即可得到优化的炼钢-连铸生产作业计划,也即初始调度方案;仿真案例的实验结果表明该仿真优化方法中具有较强的可行性与有效性,仿真8h的作业计划较实绩可缩短物流运行时间5%。进一步的仿真研究工作将向热轧工序拓展,以实现炼钢-连铸-热轧一体化的生产作业计划和调度优化。

参考文献:

- [1] 殷瑞钰. 关于钢铁制造流程的研究[J]. 金属学报, 2007,43(11):1122-1128.
YIN RUI-YU. Some science problems about steel manufacturing process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007,43(11):1122-1128.
- [2] OUELHADJ R. A Multi-agent System for the Integrated Dynamic Scheduling of Steel Production[D]. Nottingham: the University of Nottingham, 2003.
- [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, 2003,32(6): 531-537.
CHANG CHUN-GUANG, HU KUN-YUAN, WANG DING-WEI, et al. Steel Production Dynamic Scheduling Theory and Its Engineering Application: A Review[J]. Information and Control, 2003,32(6):531-537.
- [5] WU D, LERAPETRITOU M. Hierarchical approach for production planning and scheduling under uncertainty [J]. Chemical Engineering and Processing, 2007, 46(11):1129-1140.
- [6] 王秀英,柴天佑,郑秉霖. 炼钢-连铸智能调度软件的开发及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2006,12(8): 1220-1226.
WANG XIU-YING, CHAI TIAN-YOU, ZHENG BING-LIN. Intelligent scheduling software & its application in steelmaking and continuous casting [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(8): 1220-1226.
- [7] PACCIARELLI D, PRANZO M. Production scheduling in a steelmaking-continuous casting plant [J]. Computers and Chemical Engineering, 2004,28(12): 2823-2835.
- [8] TANG L X, LUH PETER B, LIU J Y, et al. Steelmaking process scheduling using lagrangian Relaxation [J]. International Journal of Production Research, 2002,40(1):55-70.
- [9] 冯振军,杨根科,杜斌,等. 炼钢连铸调度的启发式和线性规划两步优化算法[J]. 冶金自动化,2005(4): 18-22.
FENG ZHEN-JUN, YANG GEN-KE, DU BIN, et al. Two stage optimization algorithms based on heuristic and linear programming in continuous casting scheduling [J]. Metallurgical Industry Automation, 2005(4):18-22.
- [10] 崔建双,李铁克,张文新. 混合流水车间调度模型及其遗传算法[J]. 北京科技大学学报,2005,27(5): 623-625.
CUI JIAN-SHUANG, LI TIE-KE, ZHANG WEN-XIN. Hybrid flow shop scheduling model and its genetic algorithm[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005,27(5):623-626.
- [11] COWLING P, JOHANSSON M. Using real time information for effective dynamic scheduling [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 139(2): 230-244.
- [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(21): 75-78.
ZHENG ZHONG, HE LA-MEI, GAO XIAO-QIANG. Cellular automata model for simulating logistics system in steel-making process [J]. Iron and Steel, 2004, 39 (21): 75-78.
- [13] 李苏剑,常志明. 准时制生产方式下的物流管理[J]. 物流技术,2000(5):3-5.
LI SU-JIAN, CHANG ZHI-MING. Just-in-Time logistics management [J]. Logistics Technology, 2000(5):3-5.
- [14] 何腊梅,郑忠,高小强. 基于时间倒推和流程仿真炼钢生产计划的制定[J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2006,29(9):60-63.
HE LA-MEI, ZHENG ZHONG, GAO XIAO-QIANG. Production planning method for steelmaking-continuous casting process based on time backward and process simulation [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006,29(9):60-63.

(编辑 王维朗)