

炼钢厂连铸机的开浇时间决策优化模型

龚永民¹, 郑忠¹, 龙建宇¹, 高小强²

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学 经济与工商管理学院, 重庆 400045)

摘 要: 针对炼钢厂连铸机开浇时是否连浇以及开浇时间确定等问题,从钢厂生产线上待加工的铁水/钢水金属资源平衡的角度,建立了以连铸生产总效益最大为目标函数的连铸机开浇决策的混合整数规划模型,并用基于 MATLAB 软件的 YALMIP 优化工具进行模型的求解. 针对某钢厂的实际情况进行模型的应用测试,结果表明:模型可以优化决策连铸机各浇次的开浇时间,有助于编制合理的炼钢厂生产调度作业计划,稳定各班次之间的生产条件,降低生产线上的积压金属量,为炼钢厂连铸机的有序开浇提供了技术手段.

关 键 词: 连铸机;开浇决策;优化模型;安全库存;混合整数规划

中图分类号: TF 089; F 406.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)02-0203-05

An Optimization Model for Casting Start Time Decision of Continuous Caster in Steel Plant

GONG Yong-min¹, ZHENG Zhong¹, LONG Jian-yu¹, GAO Xiao-qiang²

(1. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. College of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400045, China. Corresponding author: ZHENG Zhong, E-mail: zhengzh@cqu.edu.cn)

Abstract: From the aspect of the resource balancing of the hot-metal/liquid-steel in a steel plant, a mixed integer linear programming model with the objective of maximizing the total benefit of continuous casters was established for casting start time decision of continuous caster (CSDCC). The model was solved by YALMIP optimizer based on MATLAB. Application tests were conducted with the instances from the practical production process in a steel plant to evaluate the proposed model. The results show that the casting start time of continuous casters can be predicted accurately, which is beneficial to make a feasible schedule, to stabilize the production conditions for the shifting of working groups, and to reduce the quantity of hot-metal/liquid-steel stored in the production line. The CSDCC model provides a useful tool for steel plant to determine the optimized casting start time of continuous caster.

Key words: continuous caster; casting start time decision; optimization model; safe stock; mixed integer linear programming

连铸机开浇时间决策(casting start time decision of continuous caster, CSDCC)问题的核心任务是确定连铸机各待开浇次是否能与前浇次连浇以及具体的开浇时间. 合理确定连铸机待开浇次的开浇时间是编制炼钢-连铸生产作业计划的前提条件. 实际生产中,炼钢连铸生产作业计划通常是由调度员人工确定开浇时间后再编制完成,开浇时间的合理性成为制约钢厂生产作业计

划顺利实施的重要因素. 因此研究 CSDCC 问题有重要现实意义.

炼钢厂生产线上铁水/钢水的金属资源量平衡是影响开浇决策有效性的重要条件. 近年来,国内外专家学者对炼钢-连铸生产的计划调度问题广为关注,研究取得明显进展^[1-8]. 在与连铸机开浇时间相关的研究中,文献[3]设计了一种利用已知铁水量循环迭代计算开浇时间的调度算法;

收稿日期: 2014-12-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51474044, 50574110); 重庆市科技攻关重点项目(CSTC2011AB3053).

作者简介: 龚永民(1973-),男,四川南充人,重庆大学博士研究生; 郑忠(1963-),女,浙江淳安人,重庆大学教授,博士生导师; 高小强(1963-),男,四川崇州人,重庆大学教授.

文献[4]从最小电能消耗角度研究了包括连铸机开浇等在内的调度作业时间计算方法;文献[5]提出了在假设某台连铸机开浇时间已知情况下求解其他连铸机开浇时间的方法.然而,在目前研究中大多对影响连铸机按计划连浇的因素进行了简化处理,将研究重点集中在对时间因素进行分析处理的生产作业计划的编制方法方面,未涉及影响开浇时间的生产线上铁水/钢水金属资源平衡各因素与开浇决策的关系,因而制约了炼钢-连铸生产计划调度问题研究成果的现实应用效果.

因此,在综合考虑炼钢厂进铁量、浇铸钢水量、在线安全库存金属量、金属损耗等涉及铁水/钢水的金属资源平衡各因素之间相互关系的基础上,建立了混合整数规划模型,用基于 MATLAB 软件的 YALMIP 优化工具对模型求解,并以某钢厂的连铸机开浇决策实例进行模型的应用测试.

1 问题描述

炼钢厂一般有若干台连铸机,在进行连铸机待开浇次的开浇决策时,应以决策的综合效益最大化为目标,即从控制生产线上的积压金属量的成本最小和使连铸机的连续化程度收益最大来综合考虑.

生产线上铁水/钢水的金属资源平衡状况会影响连铸机的开浇时间和运行状态.为了量化与金属资源平衡相关的影响因素,用积压金属量及其构成关系式来统一描述: $[\text{积压金属量}] = [\text{期初在线库存金属量}] + [\text{累计进铁量}] - [\text{累计浇钢量}] - [\text{累计金属损耗量}] - [\text{期末在线安全库存金属量}]$.若积压金属量过大,则与开浇决策目标相违背;若小于零,又会危及期末在线安全库存金属量及下一计划期连铸机的连续浇铸.因此,在

保证足够的安全库存金属量的情况下,可将积压金属量的下限控制标准设为零.

计划期内累计浇钢量为各台连铸机浇钢量之和,单台连铸机浇钢量分别由前一计划期遗留任务浇钢量和本计划期待开浇次浇钢量构成.

累计金属损耗量与计划期累计浇钢量有关.为简化计算,假设计划期金属损耗系数等于前一计划期已知的金属损耗系数,则本计划期累计金属损耗量可表示为:累计金属损耗量 = 损耗系数 \times 累计浇钢量 \div (1 - 损耗系数).

在线安全库存金属量由平均在线库存金属量和随机变动需求两部分金属量构成.其中,平均在线库存金属量可用公式^[9]“平均库存 = 平均单位时间产出 \times 平均流程时间”计算;随机变动需求金属量体现了因浇注周期、拉速、流程设备故障等随机变化因素引起的对金属资源的需求大于平均计算值的部分,为简化计算,可依据经验将其取为常数.

对于决策目标中的连铸机连续化程度可以借鉴文献[10]的连续化程度概念来量化描述:连续化程度 = 各铸机作业时间之和 \div (开浇铸机数量 \times 计划期).

据此,明确 CSDCC 问题的决策内容和优化目标.为有利于问题求解,作出如下基本假设:

- ① 在计划期内,各连铸机待开浇次数量已知,同浇次内不出现非计划停浇现象;
- ② 计划期进铁总量可预知,各连铸机无优先连浇顺序限制.

2 CSDCC 数学模型与求解

为便于描述,定义模型参数、变量及其单位如表 1 所示,其中 x_{ij}^k, y_{ij}^k 为决策变量.

表 1 模型参数和变量
Table 1 Parameters and variables used in the model

符号	含义	符号	含义
k	计划期序号, $k \in \{1, 2, \dots, \Omega\}$	st_{ij}^k	第 k 计划期第 i 铸机第 j 浇次最小间隔, min
i	铸机序列号, $i \in \{1, 2, \dots, H\}$	rt_{ij}^k	第 k 计划期第 i 铸机第 j 浇次遗留任务结束时刻, min
j	浇次序号, $j \in \{1, 2, \dots, N_i^k\}$	pt_{ij}^k	第 k 计划期第 i 铸机第 j 浇次浇铸周期, min
ρ	钢液密度, $t \cdot m^{-3}$	rs_{ij}^k	第 k 计划期第 i 铸机第 j 浇次遗留任务平均拉速, $m \cdot min^{-1}$
η	金属损耗系数, $t \cdot t^{-1}$	ws_{ij}^k	第 k 计划期第 i 铸机第 j 待开浇次平均拉速, $m \cdot min^{-1}$
q_o	各炉次平均浇钢量, t	ra_{ij}^k	第 k 计划期第 i 铸机第 j 浇次遗留任务断面面积, m^2
τ_A^k	第 k 计划期全流程平均物流时间, min	wa_{ij}^k	第 k 计划期第 i 铸机第 j 待开浇次任务断面面积, m^2
τ_s^k	第 k 计划期开始时刻, min	rq_{ij}^k	第 k 计划期第 i 铸机第 j 浇次遗留任务浇钢量, t
τ_e^k	第 k 计划期结束时刻, min	x_{ij}^k	第 k 计划期第 i 铸机第 j 待开浇次开浇时刻, min
n_{ij}^k	第 k 计划期第 i 铸机第 j 浇次计划浇铸炉数	y_{ij}^k	二进制变量, 1 表示第 k 计划期第 i 铸机第 j 浇次与遗留任务断浇, 0 表示连浇

2.1 目标函数

根据上述描述与分析,建立目标函数及其各指标间的构成关系如下:

$$\max Z = C_1 \Theta^k - C_2 Q_o^k; \quad (1)$$

$$\Theta^k = \frac{\sum_{i=1}^H \left(\frac{rq_{ij}^k}{rs_{ij}^k \cdot \rho \cdot ra_{ij}^k} + \sum_{j=1}^{N_i^k} (\min(\tau_e^k, x_{ij}^k + p\tau_{ij}^k) - x_{ij}^k) \right)}{(\tau_e^k - \tau_s^k) \cdot H} 100\%,$$

$$\forall i \in [1, H], \forall j \in [1, N_i^k]; \quad (2)$$

$$Q_o^k = Q_E^k + Q_I^k - Q_S^k - Q_L^k - Q_C^k; \quad (3)$$

$$Q_C^k = \sum_{i=1}^H rq_{ij}^k + \sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^{N_i^k} (\min(\tau_e^k, x_{ij}^k + p\tau_{ij}^k) - x_{ij}^k) \cdot \rho \cdot wa_{ij}^k \cdot ws_{ij}^k, \quad (4)$$

$$Q_{ca}^k = \frac{Q_C^k}{\tau_e^k - \tau_s^k}; \quad (5)$$

$$Q_L^k = Q_C^k \cdot \frac{\eta}{1 - \eta}; \quad (6)$$

$$Q_a^k = \frac{\tau_A^k \cdot Q_{ca}^k}{1 - \eta}; \quad (7)$$

$$Q_S^k = Q_a^k + Q_{rcon}^k. \quad (8)$$

式(1)表示目标函数由连续化程度收益减去积压金属量的成本构成,其中:效益系数 C_1 可从连续化程度提高带来的连铸区域吨钢能源介质、中包耐材、辅助材料等消耗减少,以及劳动生产率提高带来人工成本节约等因素计算得到参考值;成本系数 C_2 可从炼钢厂统计数据库中的平均吨钢生产成本中因铁水/钢水积压等待所导致的 LF 工序升温的电耗成本增加关系等计算得出。

式(2)表示连续化程度(Θ^k)等于各台连铸机的遗留任务浇铸时间与待开浇次浇铸时间之和除以 H 台连铸机总的计划期时间;式(3)表示积压金属量(Q_o^k)分别由该计划期的进铁量(Q_E^k)、期初库存金属量(Q_I^k)、在线安全库存金属量(Q_S^k)、金属损耗量(Q_L^k)、浇钢量(Q_C^k)的关系构成,其中 Q_E^k 和 Q_I^k 为已知参数;式(4)表示计划期累计浇钢量等于各台连铸机的遗留任务量与待开浇次浇钢量之和;式(5)表示 H 台连铸机在计划期内的单位时间平均浇钢量(Q_{ca}^k)等于累计浇钢量除以计划期长度;式(6)表示当计划期金属损耗系数已知时,累计金属损耗量与累计浇钢量的相互关系;式(7)表示当用单位时间平均浇钢量计算平均在线库存金属量(Q_a^k)时,应该利用金属损耗系数 η 将其折算成相应数量的铁水量;式(8)表示在线安全库存金属量需要在平均在线库存金属量

的基础上加一个随机变动需求金属量(Q_{rcon}^k)。

2.2 约束条件

1) 各待开浇次之间的连浇关系约束:

$$\tau' + s\tau_{ij}^k \cdot y_{ij}^k \leq x_{ij}^k \leq \tau' + (\tau_e^k - \tau') \cdot y_{ij}^k, \quad \forall i \in [1, H], \forall j \in [1, N_i^k]. \quad (9)$$

其中:当决策待开浇次与遗留任务之间是否连浇时,式(9)中

$$\tau' = r\tau_{ij}^k = \frac{rq_{ij}^k}{\rho \cdot rs_{ij}^k \cdot ra_{ij}^k}, \quad \forall i \in [1, H], \forall j \in [1, N_i^k]. \quad (10)$$

$$rq_{ij}^k = n_{i(j=N_i^k-1)}^{k-1} \cdot q_o - (\tau_e^{k-1} - x_{i(j=N_i^k-1)}^{k-1}) \cdot \rho \cdot wa_{i(j=N_i^k-1)}^{k-1} \cdot ws_{i(j=N_i^k-1)}^{k-1}, \quad \forall i \in [1, H], \forall j \in [1, N_i^{k-1}]. \quad (11)$$

式(9)和式(10)表示当决策待开浇次与遗留任务连浇时,开浇时间点取遗留任务结束时刻,非连浇时取遗留任务结束时刻加上浇次间隔时间至计划期结束某时刻;式(11)表示第 k 计划期第 i 台连铸机第 j 浇次遗留任务量等于该铸机前一计划期计划浇钢量与已浇铸量的差值。

当决策其余各待开浇次之间是否连浇时,式(9)中

$$\tau' = x_{i(j-1)}^k + p\tau_{ij}^k, \quad \forall i \in [1, H], \forall j \in [1, N_i^k]. \quad (12)$$

式(9)、式(12)表示当决策与遗留任务相邻的其余各待开浇次相互连浇时,该开浇时间点取前浇次结束时刻,非连浇时取前浇次结束时刻加上浇次间隔时间至计划期结束某时刻。

2) 各待开浇次时间与计划期起止时间关系约束:

$$\tau_s^k \leq x_{ij}^k \leq \tau_e^k, \quad \forall i \in [1, H], \forall j \in [1, N_i^k]. \quad (13)$$

3) 积压金属量约束:

$$0 \leq Q_E^k + Q_I^k - Q_S^k - Q_L^k - Q_C^k. \quad (14)$$

2.3 模型求解

上述模型中同时包含实数决策变量 x_{ij}^k 与 0-1 决策变量 y_{ij}^k , 属于混合整数规划问题。为有效求解,基于 MATLAB 7.10 软件编程,运用 YALMIP R20140605 优化工具箱进行模型求解。考虑生产的连续性特征,进行连续计划期的开浇决策问题计算时,需要将前一计划期的在线安全库存金属量与积压金属量之和作为后一计划期的期初库存金属量,并按照式(11)计算前一计划期的遗留任务结束时刻,以便让计算结果能够反映跨越相邻计划期的浇次的时间连续性。

3 实例分析

以国内某炼钢厂连铸机开浇决策实际数据为例,进行模型及算法的应用效果检验,并与生产中依据人工经验的实际决策结果进行比较分析。

3.1 实例输入

实例企业有 5 台连铸机,生产中 CSDCC 由人工凭经验确定.取 3 个连续班组的生 产数据如下: $Q_{11}^k=5\,909\text{ t}$, $Q_{12}^k=5\,575\text{ t}$, $Q_{13}^k=5\,323\text{ t}$, $Q_{\text{E}}^k=2\,815\text{ t}$, $Q_{\text{recon}}^k=290\text{ t}$, $\tau_A^k=270\text{ min}$, $\rho=7.1\text{ t/m}^3$, $s\tau_{1j}^k=80\text{ min}$, $s\tau_{2j}^k=80\text{ min}$, $s\tau_{3j}^k=90\text{ min}$, $s\tau_{4j}^k=90\text{ min}$, $s\tau_{5j}^k=100\text{ min}$, $C_1=43.5\text{ 元/1\%}$, $C_2=1.8\text{ 元/t}$,各班连铸机参数如表 2 所示,其中, N_o 为铸机号, gr_i 为班组号.实际决策的开浇时间甘特图如图 1a 所示,将此作为模型比较的基础。

模型实验分两组:一组以班组作业时间为计划期,各班组各台连铸机浇钢总浇次数、进铁量与生产实际相同,简称按班决策;另一组以全天作业时间为计划期,全天各台连铸机开浇总浇次数、进

铁量与生产实际相同,简称按日决策。

表 2 各班组连铸机参数
Table 2 Parameters of continuous caster in each working shift

N_o	n_{ij}^k			$rs_{ij}^k(ws_{ij}^k)$			$ra_{ij}^k(wa_{ij}^k)$		
	gr_1	gr_2	gr_3	gr_1	gr_2	gr_3	gr_1	gr_2	gr_3
cc1	12	12	12	1.50	1.5	1.4	0.4	0.40	0.40
cc2	10	10	10	1.50	1.5	1.5	0.24	0.26	0.26
cc3	12	12	12	0.80	0.8	0.7	0.55	0.55	0.60
cc4	10	10	10	0.55	0.6	0.6	0.49	0.49	0.49
cc5	10	10	10	1.40	1.5	1.5	0.20	0.20	0.20

3.2 模拟结果分析

图 1b 是按班决策的开浇时间甘特图.图 1c 是按日决策的开浇时间甘特图.表 3 是以浇铸时间为依据,按上述相关概念计算出的实际开浇决策与模型决策下的目标值与金属平衡等指标对比表,表中带“*”数值扣除了不满足式(14)积压金属量非负约束部分的计算值。

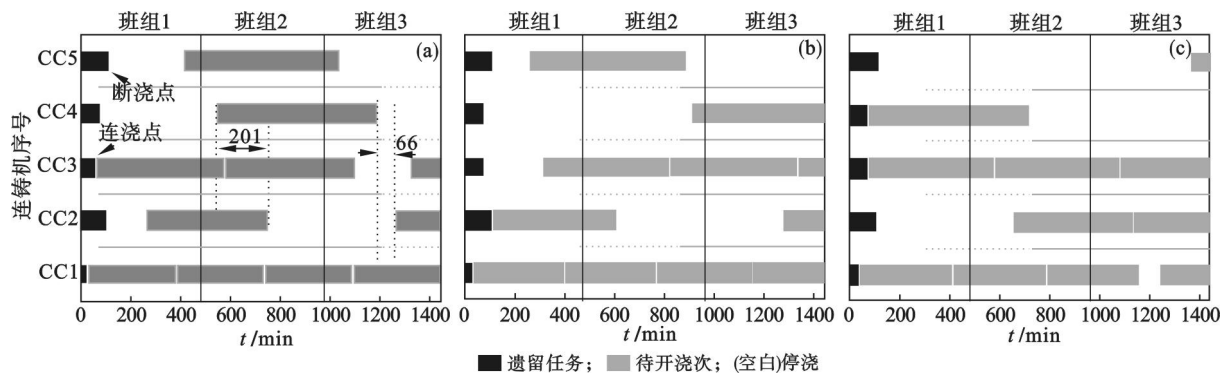


图 1 不同决策方案开浇时间甘特图
Fig. 1 Gantt chart of casting start time determined by different schedules
(a)—实际决策;(b)—按班决策;(c)—按日决策。

表 3 决策目标及金属资源平衡指标对比
Table 3 Comparison of objectives and criteria of metal material balance

指标	实际决策					按班决策					按日决策
	gr_1	gr_2	gr_3	标准差	全天	gr_1	gr_2	gr_3	标准差	全天	
Z/元	2 549 *	179 *	1 357	1 185.01	4 085	2 900	2 829	2 908	43.49	8 637	8 691
$\theta^k/\%$	64.30	84.65	50.65	17.11	66.53	66.67	65.03	66.86	1.01	66.19	66.60
Q_o^k/t	-138	-1 946	470	1 256.69	470	0	0	0	0	0	0
Q_s^k/t	3 376	4 059	2 693	683	3 376	3 326	3 390	3 322	38.16	3 346	3 342
Q_c^k/t	4 883	5 963	3 803	1 080	1 4649	4 804	4 905	4797	60.43	14 506	14 488
Q_L^k/t	603	737	470	133.5	1 810	594	606	593	7.23	1 793	1 791

注:表中带“*”数值扣除了不满足式(14)积压金属量非负约束部分的计算值。

针对图1和表3的分析如下:

1) 按模型决策的结果在生产稳定控制方面明显优于实际决策. 实际决策出现了201 min内5台连铸机的同时浇钢,66 min内仅1台连铸机浇铸的情况,而模型决策在浇铸计划期内始终保持了2台及以上连铸机连浇,生产相对均衡稳定;表3中实际决策与按班决策的标准差数据对此也有体现. 其原因在于:相对于模型决策,为了达到各浇次计划的连浇炉数,实际决策时由于缺乏对生产线上金属资源平衡进行量化计算的手段,班组1和班组2均因提前开启连铸机分别造成了-138 t, -1 946 t 积压金属量,即138 t,1 946 t 在线安全库存金属量不足,在此基础上班组3延迟开启了连铸机,又使计划期结束时的积压金属量增大. 而利用模型决策连铸机的开浇时间时,因提前综合考虑了铁钢资源平衡的影响因素并量化了各因素间的构成关系,有效避免了因开浇时间的不合理而产生的生产不稳定问题.

2) 模型决策在总效益方面优于实际决策. 在全天平均连续化程度基本相同的情况下,出现总效益差异的主要原因在于不同决策方式下的积压金属量差异所导致的成本变化,其中,实际决策因为其积压金属量大幅偏离了其控制标准而影响了总效益.

3) 当将模型的计划期时间范围从一个班次放宽到一天,并只在全天范围内限定各连铸机待开浇次总数时,模型会在更大时间范围内寻找满足新约束条件的各连铸机、各浇次的优化开浇时间,并同时实现了决策目标及金属资源平衡各指标的进一步优化,体现了模型有较强的参数变化适应能力. 在实际应用中,增大计划期有降低预测进铁量准确性的风险,也可能会影响决策结果的有效性,因此,应该在以日为计划期的决策基础上,以班组作业时间为计划期进行开浇决策的校核计算和调整.

4 结 语

1) 在综合考虑计划期累计浇钢量与期初库存金属量、在线安全库存金属量、累计进铁量、积压金属量相互关系和工艺时间约束等因素的基础上,建立了以CSDCC总效益最大为目标的混合整数规划模型.

2) 根据现实生产中各班次交替的连浇状态与计划连浇炉数相关的特点,设计了将前一计划

期的在线安全库存金属量与积压金属量之和作为后一计划期的期初库存金属量的处理方法,并应用基于MATLAB的YALMIP优化工具箱进行模型求解.

3) 某钢厂的应用实例表明,模型可以解决炼钢厂多台连铸机的开浇时间决策问题,在相同条件下与实际决策相比较,可以提高决策的总效益,减少生产线上积压的金属资源量,稳定相邻班组之间的生产条件,为炼钢厂连铸机的有序开浇提供了技术手段.

参考文献:

- [1] 常春光,汪定伟,胡琨元,等. 嵌入调整模型的CBR技术的炼钢调度系统[J]. 东北大学学报(自然科学版),2004,25(6):531-534.
(Chang Chun-guang, Wang Ding-wei, Hu Kun-yuan, et al. CBR system with embedded adaptation model for scheduling system in steel-making process[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2004, 25(6): 531-534.)
- [2] Tang L X, Guan J, Hu G F. Steelmaking and refining coordinated scheduling problem with waiting time and transportation consideration[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2010, 58(2): 239-248.
- [3] Hubert M, Wolfgang H, Werner S. A scheduling system for the steelmaking-continuous casting process: a case study from the steel-making industry[J]. *International Journal of Production Research*, 2009, 47(15): 4147-4172.
- [4] Tan Y Y, Liu S X. Models and optimization approaches for scheduling steelmaking-refining-continuous casting production under variable electricity price[J]. *International Journal of Production Research*, 2014, 52(4): 1032-1049.
- [5] 王闯,刘青,王彬,等. 特殊钢厂炼钢-连铸调度模型[J]. 北京科技大学学报,2013,35(3):371-378.
(Wang Chuang, Liu Qing, Wang Bin, et al. Scheduling model of steelmaking-continuous casting processes in special steel plants[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2013, 35(3): 371-378.)
- [6] Yu S P, Pan Q K. A rescheduling method for operation time delay disturbance in steelmaking and continuous casting production process[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2012, 19(12): 33-41.
- [7] Li T K, Guo D F. Constraint-based approach for steelmaking-continuous casting rescheduling[C]// 20th International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems. Kyoto, 2007: 1108-1117.
- [8] Dong H Y, Huang M, Ip W H, et al. On the integrated charge planning with flexible jobs in primary steelmaking processes[J]. *International Journal of Production Research*, 2010, 48(21): 6499-6535.
- [9] Kim S H, Whitt W. Statistical analysis with Little's Law[J]. *Operations Research*, 2013, 61(4): 1031-1045.
- [10] Yin R Y. Metallurgical process engineering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 165-166.