

文章编号: 1001-0920(2013)08-1257-06

炼铸轧集成计划与调度组批模型及算法

张旭君, 吕志民

(北京科技大学 高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083)

摘要: 为提高热装批量计划的调度可行性, 构建一种集成批量计划类型及部分调度约束的批量计划约束满足模型, 并采用显性基因的约束遗传算法进行优化求解. 在优化过程中, 采用一种以提高批量计划的调度可行性的基于邻域连通的快速判定方法, 同时利用判定返回的信息构建显性基因指导优化过程. 最后利用实际生产数据进行测试, 结果表明, 所提出的模型和算法能够提高热装率和批量计划调度的可行性, 并且算法的执行效率可满足实际应用的要求.

关键词: 集成计划与调度; 约束规划; 约束满足模型; 显性基因; 邻域判定

中图分类号: TP312

文献标志码: A

Model and solution of integrated batch planning and scheduling for steelmaking-continuous casting-hot rolling

ZHANG Xu-jun, LV Zhi-min

(National Engineering Research Center for Advanced Rolling, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China. Correspondent: LV Zhi-min, E-mail: lvzhimin@nercar.ustb.edu.cn)

Abstract: In order to improve the feasibility of the bath planning and to achieve a high level hot charge rate, a model integrated batch planning and scheduling is established. The problem can be formulated as a constraint satisfaction problem, the constraints in batch planning and some of the constraints in scheduling are taken into account in the model. An optimization method combined genetic algorithm with dominant gene and constraint programming is proposed to solve the model. In the process of solving, a judgment criterion based neighborhood connectivity is presented to improve the feasibility of the batch planning. And according to the returned information of the judgment criterion, dominant genes are built to guide the process of genetic optimization. The testing results show that the proposed method is feasible and the results can meet the requirements of practical application.

Key words: integrated batch planning and scheduling; constraint programming; constraint satisfaction model; dominant gene; neighborhood judgment criterion

0 引言

节能降耗是钢铁工业发展过程中面临的重大战略性任务, 采用“热送热装”工艺能够大幅度降低能耗^[1], 目前已成为钢铁生产节能降耗的重要工艺. 根据铸轧间衔接方式不同, 热送热装工艺一般分为HCR(热装)和DHCR(直接热装). 与传统CCR(冷装)工艺不同, 编制热送热装生产批量计划时必须同时考虑炼钢、连铸、热轧等生产约束条件. 热装批量计划编制的好坏, 将直接影响生产是否可以有序地进行.

钢铁行业生产批量计划问题一直是研究的热点问题之一^[2], 目前, 针对钢铁企业生产计划研究主要有两大领域: 一是合同计划, 二是各个生产工序详细

作业计划. 由于合同计划建模中主要考虑能力和时间等因素, 以提高多工序间的生产整体协调性为目标, 对作业计划层的生产工艺约束考虑较少, 导致编制的批量计划在作业调度层面可行性较差. 文献[2]介绍了炼钢-连铸-热轧生产过程、生产管理问题和相应的研究方法, 并分析了该领域的研究方向. 文献[3]建立了集成连铸-热轧生产计划数学模型, 并采用启发式算法进行求解. 该方法针对中长期计划采用虚拟板坯来衔接连铸-热轧, 最终给出多个轧制批量计划, 但模型未考虑连铸和热轧工艺间多种衔接方式的情况; 文献[4]针对直接热装和直轧工艺的特点, 提出了DHCR一体化计划调度的体系结构和一体化

收稿日期: 2012-03-07; 修回日期: 2012-07-13.

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAE03A09).

作者简介: 张旭君(1982-), 男, 博士生, 从事生产计划优化与调度方法的研究; 吕志民(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 从事生产计划优化、产品质量分析等研究.

组批模型,但是只考虑了 DHCR 工艺衔接方式.文献 [5-10] 分别针对钢厂合同计划进行建模和求解,模型中考虑了各个阶段的粗能力约束和生产批量的一些整体约束,并采用相应的优化算法进行求解,实现了多工序间整体批量计划平衡.文献 [11] 基于钢铁企业 MTO 模式建立了合同计划模型和算法,但没有考虑多种热装模式同时存在条件下的组批情况.另外目前大量研究关注于工序作业调度优化,这类研究未考虑多工序间批量计划协同问题,例如文献 [12-13] 分别对炼钢-连铸和热轧工序的生产调度问题进行建模,并提出了相应的优化求解方法,但只对本工序的批量计划进行作业调度.

目前,在离散制造业应用较为广泛的高级计划排程 (APS)^[14-15] 方法虽然在批量计划过程中考虑了作业计划层的部分工艺约束,然而钢铁企业的生产过程调度约束复杂,不同工艺模式下各个生产阶段的生产提前期不同,其生产能力需求也不一样,使得钢铁行业批量计划问题变得更为复杂,还未见到 APS 在钢铁企业成功应用的案例.

针对目前研究及应用中存在的问题,本文提出以提高热送热装比、改善批量计划在作业层可执行性为目标的集成计划与调度批量约束满足模型,将问题定义为一个多目标、多约束的装箱问题,模型中集成考虑了计划与调度两阶段的约束.采用显性基因的约束遗传算法对短期计划内的生产合同进行组批优化,批量优化的同时采用基于邻域连通的判定方法对批量调度可行性进行快速判定,并利用判定返回信息构建显性基因来指导优化过程的模型优化方法.

1 问题描述及建模

批量计划问题可抽象为一个装箱问题.装箱问题是典型的组合优化问题,已被证实是 NP 难问题.由于钢铁企业可采用多种热装工艺模式进行生产,并且不同的生产工艺条件下批量组批约束并不相同,本文拟解决的组批计划问题是一个包含批量类型决策的特殊装箱问题.另外,为了提高批量计划在作业计划层的可执行性,组批模型中需集成考虑作业计划层的调度约束.

1.1 集成计划与调度批量的约束和目标分析

本文提出的集成计划与调度模型中集成了批量约束和作业计划层的部分调度约束.根据炼铸轧集成生产工艺特点,不同批量类型的组批约束与所采用的铸轧生产工艺有关.

CCR 批量计划主要组批约束有:

1) 轧制公里数限制,每个轧制批量有轧制公里

数限制; 2) 轧制批量总重量限制; 3) 同宽公里数限制,批量内同一公称宽度的轧制长度有限制; 4) 调度序约束,相邻生产合同之间应满足轧制宽度、轧制厚度、轧制硬度、温度等跳跃要求.

HCR 生产工艺考虑组批约束时,除了 CCR 生产工艺约束外,还需考虑批量类型约束,即只有可采用 HCR 工艺或 DHCR 工艺的品种才能编入 HCR 批量.另外批量重量还需要满足浇次批量约束.

采用 DHCR 生产工艺时,需考虑组批约束.除了上述约束外,还需考虑: 1) 批量类型约束.只有可采用 DHCR 工艺的品种才能编入该批量计划.为提高 DHCR 比,可采用 DHCR 工艺的品种应尽可能采用 DHCR 方式进行组批. 2) 浇次批量规格与品种约束.考虑连铸阶段的生产工艺约束,同一个批量包内的合同要求在连铸阶段的板坯宽度和钢种必须一致.

模型考虑目标有: 1) 为提高设备工作效率,对每个批量计划应尽可能地逼近轧制总公里数或轧制总重量上限,即对应的批量包总数越少越好; 2) 为更好实现节能降耗,订单安排批量优先级依次为 DHCR、HCR、CCR; 3) 为保证批量包在作业计划层可执行,满足邻域判定的批量包个数越多越好.

1.2 约束满足模型

基于上述分析,集成批量计划组批问题的约束满足模型可描述为

$$\min \sum_{j=1}^M K_j, \quad (1)$$

$$\max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} \cdot w_{ij}, \quad (2)$$

$$\max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{K_j} x_{ijk} \cdot y_{ijk}. \quad (3)$$

s. t.

$$\sum_{j=1}^M w_{ij} = 1, \quad \forall i = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

$$x_{pjk} \cdot x_{qjk} = \begin{cases} 1, & G_p = G_q \text{ 且 } j \text{ 属于 DHCR 类型;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (5)$$

$$x_{pjk} \cdot x_{qjk} = \begin{cases} 1, & \text{SLW}_p = \text{SLW}_q \text{ 且 } j \text{ 属于 DHCR 类型;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{K_j} x_{ijk} = 1, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{K_j} x_{ijk} \cdot r_{lis} \leq SW_{\max}, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{K_j} x_{ijk} \cdot L_i \leq \text{TotalLen}_{\max}, \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^{K_j} x_{ijk} \cdot W_i \leq \text{TotalW}_{\max}, \quad (10)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{生产合同 } i \text{ 属于类型 } j \text{ 且在批量包 } k \text{ 中;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (12)$$

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{生产合同 } i \text{ 属于类型 } j \text{ 且在批量包 } k \text{ 中,} \\ & \text{同时批量包满足检查条件;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (13)$$

$$Z_{pqjk} = \begin{cases} 1, & \text{在批量类型 } j \text{ 下轧制批 } k \text{ 中, 生产} \\ & \text{合同 } q \text{ 紧挨着生产合同 } p \text{ 生产;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (14)$$

其中: i 为生产合同的序号, j 为批量类型的序号, N 为生产合同的数量, M 为批量类型的数量, p, q 为任意两个生产合同. 式(1)表示批量包总个数越少越好, 其中 K_j 为每个批量类型 j 的批量包个数. 式(2)表示每个生产合同尽可能选择权重大的批量类型, 其中 ω_{ij} 为每个生产合同对应不同的批量类型的权重, x_{ij} 为 0-1 变量, 值 1 表示生产合同 i 采用批量类型 j 进行组批. 式(3)表示调度可行的批量包的数量越多越好. 式(4)表示每个生产合同对应的批量类型的权重之和为 1. 式(5)表示 DHCR 批量类型下属于同一个批量包的生产合同的钢种必须相同. 式(6)表示 DHCR 批量类型下属于同一个批量包的生产合同的板坯宽度必须相同. 式(7)表示一个生产合同只能编制到一个批量包中. 式(8)表示批量包中同宽公里数限制条件, 其中 s 表示同宽系列, r_{lis} 表示第 i 个生产合同属于同宽系列 s 的轧制长度, SW_{\max} 为允许的最大同宽公里数. 式(9)表示批量包的轧制总长度不能超过最大轧制总公里数, 其中 TotalLen_{\max} 为允许的最大轧制总公里数. 式(10)表示批量包的总重量不能超过最大总重量, 其中 TotalW_{\max} 为允许的最大轧制总重

量. 式(11)表示批量包内相邻生产合同之间的调度约束, 其中 $W_{\text{up}}, W_{\text{down}}, H_{\text{up}}, H_{\text{down}}, G_{\text{up}}, G_{\text{down}}$ 分别为相邻生产合同允许的轧制宽度、轧制厚度、轧制硬度等跳跃范围. 式(12)~(14)表示决策变量的取值.

2 优化算法设计

2.1 算法设计思想

1.2 节中定义的集成批量计划与调度问题是一个特殊的装箱问题, 模型中变量及约束规模大, 难以采用精确的数学优化方法求得问题的解, 但可采用智能优化算法(如遗传算法)进行优化求解. 为克服遗传操作中随机性导致生成的子代不可行、寻优过程速度慢和解的质量下降的缺点, 将约束规划^[16-17]算法与遗传算法相结合构成约束遗传算法, 进行优化求解.

另外在遗传优化操作过程中, 为了提高集成计划与调度批量在作业计划层的可执行度, 且降低算法的复杂度, 本文提出一个基于邻域连通的调度可行性判定算法, 对遗传过程中生成的每个组批结果中的批量包进行快速判定. 满足判定条件的批量包即认为满足作业层生产工艺约束, 并利用判定返回信息指导遗传操作, 以改善解的质量, 提高算法执行效率.

2.2 基于邻域连通的调度可行性判定

为提高批量计划在作业计划层的可执行性, 在编制批量计划时需考虑作业计划层的调度约束, 但是在组批计划中对每一个批量包都进行详细调度排程, 则算法复杂度很高, 难以满足实际应用的要求.

结合图论知识, 定义每个批量包中生产合同构成一个有向图 $G = (V, E)$. 其中: $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为该批量包中的生产合同节点, E 为有向边集合. 如果两个节点之间存在有向边, 则表示两节点按有向边的先后生产满足调度约束. 于是判定一个批量包是否满足作业计划层的调度约束即为判定有向图 G 内是否存在一条哈密尔顿路径. 然而判定一个有向图是否存在哈密尔顿路径问题是 NP 难问题^[18], 目前理论研究中给出的有向图存在哈密尔顿路径的充分条件判定都很严格^[18]. 实际上, 不满足充分条件的许多有向图同样存在哈密尔顿路径. 本文从必要条件入手, 根据实际问题域构成的有向图特征, 提出基于邻域连通的调度可行性判定的必要性条件为:

1) 有向图必须是一个有向连通图.

2) 给定的有向图中, 所有节点都存在出度和入度. 若存在只有入度的节点, 则只能允许一个; 若存在只有出度的节点, 则只能允许一个.

尽管满足该条件的批量包调度时不一定完全可行, 但不满足判定条件的批量包调度时一定不可行. 为验证该判定条件的有效性, 利用 5 组实际生产数据

进行组批测试, 每组随机生成 100 个组批计划, 统计结果如表 1 所示. 测试结果表明, 满足判定条件的批量包可执行为 96.5%, 能满足实际生产要求.

表 1 邻域判定算法有效性测试结果

测试数据	批量包总数	满足判定批量包个数	调度可行的批量包个数	正确率/%	平均正确率/%
1	1774	788	756	95.9	96.5
2	1734	642	622	96.9	
3	1754	630	613	97.3	
4	1779	659	640	97.1	
5	1732	860	820	95.3	

为利用判定过程产生的有用信息, 对基于邻域连通的判定方法进行改进, 如图 1 所示. 利用邻域判定算法返回的信息来评价和鉴定染色体中重要的基因信息显性基因, 并指导遗传操作, 给予它们更大的机会繁殖, 使得生成的下一代更加健壮. 根据批量包邻域判定返回的信息定义两种不同的批量包: 优质包和次优包. 对优质包和次优包在遗传操作中进行不同的操作.

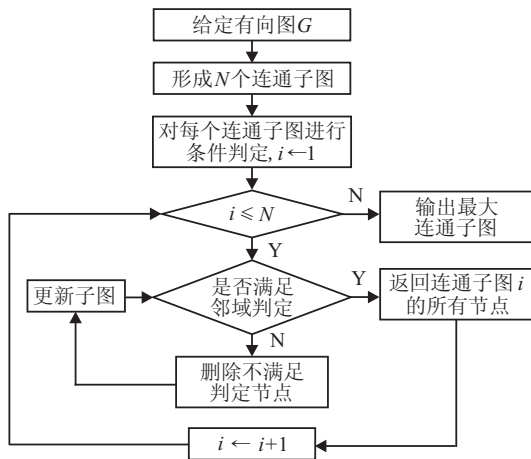


图 1 邻域判定算法流程图

2.3 算法求解步骤

整个算法求解步骤如下:

Step 1: 利用 CP 方法建立批量类型决策的约束满足模型, 以确定每份生产合同对应的批量类型. 批量类型按优先级决策.

Step 2: 对每个批量类型的生产合同进行组批, 根据批量包对染色体进行编码, 其中每个基因位表示该批量类型下生产合同对应的批量包序号, 构造遗传算法的初始种群, 初始种群中每个个体表示相应批量类型下的组批结果.

Step 3: 对每个批量包进行邻域判定, 计算个体适应度值 $F = C_1 \times Obj_1 - C_2 \times Obj_2$. 其中: C_1 、 C_2 为两个评价目标的权重系数, 且 $C_1 + C_2 = 1$; Obj_1 为批量包中满足邻域判定的可用生产合同总量, Obj_2 为该批量类型下批量包的个数. 由于两目标量纲不一致, 采用归一化处理, 即 $Obj_1 = (\text{可用生产合同总重量} / \text{该批量类型下所有生产合同总重量})$, $Obj_2 = (\text{求得批量包个数} / \text{该批量类型最大批量包个数})$. 1.2 节中式 (1) 考虑的目标已在 Step 1 中进行决策, 适应度函数计算时只考虑当前批量类型的组批情况. 判定算法流程如图 1 所示.

Step 4: 遗传算法终止条件判断, 如果满足条件, 则转 Step 6; 否则转 Step 5.

Step 5: 遗传算法的显性基因遗传操作, 选择操作采用竞赛机制方式, 变异和交叉操作如图 2 和图 3 所示. 满足条件的批量包轧制总公里数或总重量超过限定 90% 的鉴定为优质包, 用“#”标识; 超过 70% 的为次优包, 用“*”标识. 优质包或者次优包直接保留到下一代. 另外针对优质包不进行拆包操作, 即批量包中生产合同仍组合在一起进入下一代; 针对次优包则允许其他生产合同插入, 生成下一代种群, 返回 Step 3.

Step 6: 判断是否所有批量类型都进行组批. 如果是, 则算法结束, 输出结果; 否则将更新未排入计划的生产合同批量类型优先级, 重新返回 Step 2 进行组批.

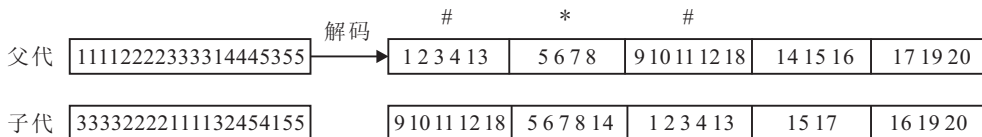


图 2 显性基因变异遗传操作示意图

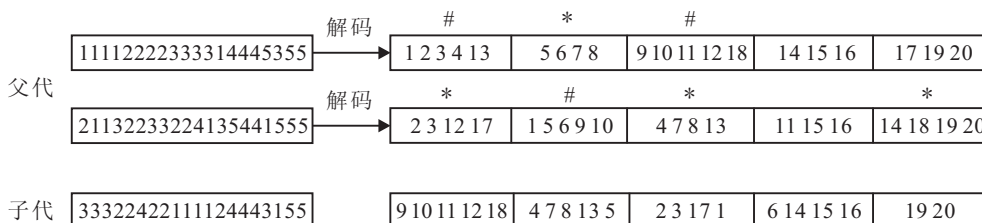


图 3 显性基因交叉遗传操作示意图

2.4 算法复杂度分析

约束遗传算法的计算复杂度可分为两个方面：一是遗传算法的迭代次数 C ；二是每一代遗传算法的计算量，包括计算适应度函数值和约束规划求解。计算适应度函数值对每一个批量包进行邻域连通的可行性判定，采用邻接矩阵进行各个节点的出入度计算，算法的时间复杂度为 $o(P^2)$ ，其中 P 表示所有批量包中最多的生产合同个数。约束规划方法采用约束传播算法对约束变量值域进行修剪，然后建立搜索树进行遍历。约束传播算法的最大计算量为 $M \times n \times d^2$ 。其中： M 为模型中约束的个数， n 为约束变量的个数， d 为约束变量中最大值域。采用搜索树算法为深度优先算法，深度优先算法的时间复杂度取决于搜索树的节点个数 $N = 2 \times \prod_{i=1}^n D_i$ ，其中 D_i 表示每个决策变量的值域。深度优先算法的时间复杂度为 $o\left[\left(\prod_{i=1}^n D_i\right)^2\right]$ 。

可以看出，深度优先算法的复杂度依赖于约束传播算法对值域的修剪。

综上所述，本文采用的显性基因的约束遗传算法的时间复杂度为

$$o\left[P^2 + M \times n \times d^2 + \left(\prod_{i=1}^n D_i\right)^2\right]$$

3 求解结果

利用某钢厂计划期内 6 组不同的生产合同数据进行组批测试。组批最小单位为炉次，每组数据 200 个炉次，测试集 1 中合同只能采用 CCR 方式，测试集 2 中合同全部可采用 DHCR 方式，其他测试集为混合情况。针对测试集分别进行 3 种不同的遗传优化操作：第 1 种方法为传统求解方法，第 2 种和第 3 种方法采用基于邻域判定算法的显性基因约束遗传算法。后两种方法的区别在于，第 2 种方法只保留优质包，第 3 种方法在遗传操作中既利用优质包信息又利用了次优包的信息。求解结果对比如表 2 所示。

表 2 采用不同算法的组批结果

算法	测试数据集	DHCR		HCR		CCR		满足判定 可用率/%	DHCR 率/%	剩余 炉数	运行 时间/s
		组批个数	组批重量	组批个数	组批重量	组批个数	组批重量				
不采用 邻域判定 算法	1	0	0	0	0	9	31 020	70.5	0	59	36.4
	2	9	29 260	1	4 180	1	4 180	85.5	66.5	29	110.8
	3	4	10 340	6	23 980	11	3 300	85.5	29.0	29	43.4
	4	4	10 560	6	23 100	2	6 160	90.5	29.3	19	45.2
	5	5	14 300	5	19 360	2	7 480	93.5	36.3	13	119.0
	6	6	16 940	4	15 180	1	4 400	83	43.0	34	60.4
采用 邻域判定 算法 不保留 次优包	1	0	0	0	0	12	44 000	100	0	0	244.2
	2	10	34 320	2	9 460	0	0	99.5	78	1	311.2
	3	6	15 840	5	19 800	2	7 260	97.5	44.4	5	251.3
	4	4	11 660	6	24 420	2	7 040	98	32.3	4	348.4
	5	6	16 940	6	22 440	1	3 740	98	43.0	4	169.2
	6	8	24 420	4	14 960	1	3 300	97	62.0	6	246.7
采用 邻域判定 算法 且保留 次优包	1	0	0	0	0	12	44 000	100	0	0	49.5
	2	11	39 820	1	4 180	0	0	100	90.5	0	83.5
	3	7	18 920	4	16 720	2	7 920	99	53.1	2	58.0
	4	6	18 040	4	18 040	2	7 480	99	50	2	209.8
	5	7	19 580	5	19 800	1	3 740	98	49.7	4	56.9
	6	9	26 180	3	13 200	1	3 520	97.5	66.5	5	128.0

从结果对比可以看出：第 1 种方法的算法求解时间较快，但解质量最差；第 2 种方法在求解质量上有了明显的改善，但由于没有保留次优包信息，导致算法寻优速度下降。综合求解质量和求解时间分析，本文采用的方法明显优于其他两种方法。

为验证所提出的基于邻域连通的调度可行性判定条件的有效性，对表 2 中数据集 1 的 12 个批量计划进行详细作业计划排程，每个批量计划均调度可行，且满足实际生产工艺要求。

4 结 论

本文提出了一个炼-铸-轧集成计划与调度组批

模型和求解算法，模型中集成考虑了铸轧间不同生产工艺的批量约束和部分作业计划层的调度约束。采用显性基因的约束遗传算法进行优化求解，提高了解的质量和优化速度。在不对批量包进行详细调度排程的基础上，通过邻域连通的快速判定方法可提高批量包在作业计划层的可执行性。通过实际生产数据测试表明，本文提出的方法是可行且有效的。

参考文献(References)

[1] 吕志民, 徐金梧. 一种适用于热送热装生产计划优化的方法[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(6): 675-678.
(Lv Z M, Xu J W. Optimization method for hot charge

- rolling manufacture plan[J]. J of University Science Technology Beijing, 2002, 24(6): 675-678.)
- [2] Tang Lixin, Liu Jiyin, Rong Aiyang, 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.
- [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] 许剑, 吕志民, 徐金梧. 基于并行策略的冶铸轧一体化组批模型及算法[J]. 控制与决策, 2006, 21(9): 979-983.
(Xu J, Lv Z M, Xu J W. Model and algorithm of integrative batch planning based on parallel strategy for steelmaking-continuous casting-hot rolling[J]. Control and Decision, 2006, 21(9): 979-983.)
- [5] 高聪, 唐立新, 唐建勋, 等. 禁忌搜索算法解决钢铁企业生产合同计划优化问题[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 30(7): 944-947.
(Gao C, Tang L X, Tang J X, et al. Tabu search for real order planning problem in steel industry[J]. J of Northeastern University: Natural Science, 2009, 30(7): 944-947.)
- [6] 於春月, 许美蓉, 曲蓉霞. 冶铸轧一体化生产合同计划优化问题研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2008, 29(11): 1548-1551.
(Yu C Y, Xu M R, Qu R X. On the production order planning of integrated steel production SM-CC-HR-FF[J]. J of Northeastern University: Natural Science, 2008, 29(11): 1548-1551.)
- [7] 於春月, 王成恩. 钢铁一体化生产多目标合同计划建模与算法[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(12): 1452-1454.
(Yu C Y, Wang C E. Multi-objective order-planning model and algorithm for integrated steel production[J]. Control Theory & Applications, 2009, 26(12): 1452-1454.)
- [8] 张涛, 程海刚, 张玥杰, 等. 基于 MTO-MTS 的钢厂合同计划方法[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(11): 85-93.
(Zhang T, Cheng H G, Zhang Y J, et al. A method based on MTO-MTS for the order planning of the steel plant[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2008, 28(11): 85-93.)
- [9] 孙裕. MES 合同计划排程的研究应用[J]. 自动化仪表, 2010, 31(10): 35-37.
(Sun Y. Research and application of the order planning and scheduling in MES[J]. Process Automation Instrumentation, 2010, 31(10): 35-37.)
- [10] 卢克斌, 黄可为, 汪定伟, 等. 钢铁企业合同计划与余材匹配的集成优化方法[J]. 控制与决策, 2009, 24(1): 71-75.
(Lu K B, Huang K W, Wang D W, et al. Integrated optimization approach of contract planning and surplus inventory matching of steel mill[J]. Control and Decision, 2009, 24(1): 71-75.)
- [11] 徐端, 屠乃威, 孙亮亮, 等. 考虑生产路径柔性的钢铁合同计划编制研究[J]. 控制工程, 2009, 16(4): 502-506.
(Xu D, Tu N W, Sun L L, et al. On order planning with production path flexibility[J]. Control Engineering of China, 2009, 16(4): 502-506.)
- [12] Zhang Xujun, Lv Zhimin. Model and solution for steelmaking-continuous casting scheduling problem based on constraint programming method[C]. Int Conf on Information Technology and Computer Science. Washington: IEEE CS Press, 2009: 19-22.
- [13] Tang Lixin, Liu Jiyin, Rong Aiyang. et al. A multiple traveling sales-man problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex[J]. European J of Operational Research, 2000, 124(2): 267-282.
- [14] Chen Kejia, Ji Ping. A mixed integer programming model for advanced planning and scheduling(APS)[J]. European J of Operational Research, 2007, 181(1): 515-522.
- [15] Moon C, Kim J S, Gen M. Advanced planning and scheduling based on precedence and resource constraints for e-plant chains[J]. Int J of Production Research, 2004, 42(15): 2941-2955.
- [16] Sangh Yun Kim. Adaptations of constraint programming to aircraft scheduling problems[D]. Washington: Department of Systems Science and Mathematics, Washington University, 2001.
- [17] Nuijten W, Aarts E. A computational study of constraint satisfaction for multiple capacitated job shop scheduling[J]. European J of Operational Research, 1996, 90(2): 269-284.
- [18] Bang-Jensen J, Gutin Gregory. Digraphs theory, algorithms and applications[M]. Beijing: Science Press, 2009: 227.