

炼钢-连铸-热轧一体化生产计划排程方法研究

Research of integrated scheduling method of steelmaking-continuous casting-hot rolling

刘超, 王森, 周维, 刘丽兰

LIU Chao, WANG Sen, ZHOU Wei, LIU Li-lan

(上海大学 上海市智能制造及机器人重点实验室, 上海 200072)

摘要: 对钢铁生产中炼钢、连铸、热轧三个关键工序的单工序排程的目标和影响因素进行分析, 针对单工序生产计划排程存在的协调匹配问题, 利用国内外求解炉次计划和浇次计划的背包模型和求解轧次计划的多旅行商模型, 建立炼钢-连铸-热轧一体化生产计划排程的模型体系, 并提出一种按各工序生产需求制定生产初计划, 按各工序生产能力调整初计划的策略来保证生产的连续性和平衡性。

关键词: 生产计划排程; 多工序一体化; 模型体系; 炼钢-连铸-热轧

中图分类号: TP13

文献标识码: A

文章编号: 1009-0134(2015)05(上)-0081-03

Doi: 10.3969/j.issn.1009-0134.2015.05(上).22

0 引言

炼钢、连铸、热轧是钢铁生产的三个关键工序, 工序间连接紧密, 呈顺序加工的关系, 前一工序加工的产品为后一工序的原材料, 整个生产过程是在高温状态下进行, 为了保证生产的连续性, 以提高生产能力, 降低能源消耗, 降低库存, 必须从多工序一体化角度出发, 编制生产计划。

目前关于钢铁生产计划编制的研究已经取得了一些成果。多集中于某一工序最优生产计划编制, 如文献[1]考虑钢种、断面、交货期等因素, 建立了新的炉次计划模型, 并采用改进单亲遗传算法对其进行求解。文献[2]以最小化开浇费用、炉次间连浇惩罚费用及未被选炉次惩罚费用为目标, 建立了浇次计划的旅行商模型并进行求解。文献[3]建立了基于准时制的热轧生产日计划模型, 并采用具有动态启发式调整策略的混合遗传算法对模型求解。对某一工序最优生产计划的编制可以很好的安排本工序的生产任务, 保证生产质量和生产效率, 但没有考虑相邻工序的生产能力与生产需求, 不可能满足整体生产的连续性需求, 因此不可能达到全局的最优解。相邻两工序一起考虑的生产计划排程的研究也有很多, 如文献[4]中首先通过求解炼钢炉次计划编制的多个炉次计划候选方案, 以多个炉次计划候选方案为浇次计划的编制对象, 求得最优浇次计划, 最后根据浇次计划从炉次计划的候选方案中确定炉次计划。文献[5]建立了整个连铸-热轧一体化生产调度过程多智能体系统模型, 讨论了各智能体之间的协同工作问题。综合考虑相邻两工序间协同工作在一定程度上缓解了生产过程中的前后工序不能协调生产的问题, 但仍然不能满足钢铁多

工序一体化生产的要求。而基于炼钢-连铸-热轧多工序一体化生产排程是目前国内外研究的热点, Quintiq公司研究的钢轧一体化生产计划排程系统, 通过各工序间生产计划的协调优化、以KPI为核心的实时报告工具以及先进的自动化计划功能来优化生产计划, 极大地提高了生产效率。美国的Aspen研发的PPS(生产计划及排程系统)是专门针对钢铁冶金行业供应链解决方案, 所有模块由参数驱动, 采用基于约束的运算规则, 来确定物料和生产能力的配置顺序。文献[6]统一炼钢、连铸、热轧的目标函数, 通过对目标函数的组合来实现各阶段计划的有效衔接, 但并没有考虑前后工序的供需关系。文献[1]提出基于模型控制和参数控制的两级控制策略来解决冶、铸、轧三个关键工序间协调匹配的问题, 但模型和参数的微小调整对整个生产计划的编制影响较大。

综上所述, 炼钢连铸热轧多工序一体化生产计划排程是目前研究的热点和难点, 还存在很多问题亟待被解决。本文通过分析炼钢、连铸、热轧三个关键工序的生产约束与排程特点, 考虑前后工序的供需关系与生产规程约束的特点, 建立一体化生产计划排程体系, 并给出合适的求解策略。

1 钢铁生产单工序排程与问题描述

1.1 钢铁生产工艺流程

钢铁生产的工艺流程如图1所示, 主要为: 转炉炼钢, 连铸, 热轧几个阶段。生产过程是把生铁或者铁水放入转炉中, 进行氧化、脱硫后转化为钢水, 有钢级要求的进入精炼炉进行精炼。然后把钢水经过中间包送入连铸机内, 经过固化、冷却、拉流、切割成具有一定规

收稿日期: 2015-02-02

基金项目: 国家高技术研究发展863计划(2013AA040703)

作者简介: 刘超(1989-), 男, 河南人, 硕士研究生, 研究方向为制造业信息化和生产计划排程。

格和钢级的板坯。板坯经加热炉加热后（板坯在加热炉中遵守先进先出的原则），进入轧机加工成形状和规格满足合同要求的中厚板、钢管等产品。

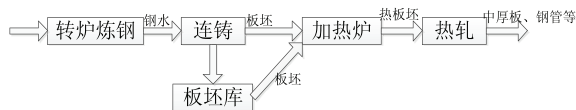


图1 钢铁生产工艺流程示意图

1.2 钢铁生产单工序排程影响因素分析

1.2.1 炼钢生产计划排程分析

炼钢过程是一个以“炉次”为单位进行的复杂的物理和化学变化的过程。在炼钢生产阶段，由于中间订单（热轧板坯）或最终订单（如热轧带钢）的需求在钢级、规格、物理特性、交货期等诸因素之间存在一定差别，根据炼钢工艺的要求和组成同一炉次的板坯的特征限制，需要将订单进行组合，形成不同的炉次计划，组成同一炉次的订单需要考虑以下工艺规程^[8]：1)钢种尽量相同，当高低钢种组合在一起生产，钢种的化学成分相近，且高判低；2)板坯宽度、厚度相同，板坯的宽度、厚度要满足一定的宽度组、厚度组^[9]；3)交货期相近的板坯尽量安排一炉生产，便于运输。4)组成一炉的板坯总重量大于炉容总量的95%，且小于最大炉容量。

1.2.2 连铸生产计划排程分析

浇铸过程是以“浇次”为单位来进行的，一个浇次是指同一台连铸机上同一个中间包，使用同样的结晶器连续浇铸的炉次的集合。对于连铸机来说，每开启一次机器需要设备调整时间和调整费用，为了提高生产率和成材率，需要有更多的炉次在同一连铸机上进行连续浇注，以降低总调整费用。

组成同一浇次的炉次之间要满足如下条件：1)相邻炉次之间的钢级相同或相近，最多不能超过两级；2)炉次之间板坯的厚度相同；3)板坯的宽度变化不允许超过一定次数；4)不同宽度的炉次组成同一浇次，按宽度非增排列，变化在一定范围内；5)同一浇次中的炉次数一般在3~7炉之间，不能少于3炉，也不能高于中间包的寿命；6)炉次之间的交货期相近。

1.2.3 轧制生产计划排程分析

轧制计划属于热轧阶段生产批量计划。以生产订单中的板坯为计划对象，进行生产计划排程，在制定生产计划时候，为必须遵循一定的工艺规程，待轧板坯在热轧车间的加工次序要受到板坯宽度、厚度和硬度的限制。满足一定工艺约束的板坯排序形成了热轧批量计划，热轧批量计划编制的好坏直接关系到热轧车间的生产效率和产品的质量。

组成同一轧制单元的板坯需要满足的条件^[10]：1)

板坯总长度在一定范围内；2)烫辊材板坯宽度由窄到宽，相邻板坯宽度差不超过200mm，主体材板坯宽度由宽到窄；3)相同宽度的板坯总长度在一定范围内变化；4)板坯厚度非增方向变化，且变化不能太大；5)板坯硬度变化平稳，不能反复跳跃；6)宽度、厚度、硬度3者的优先级为硬度-厚度-宽度，且不能同时变化。

1.3 钢铁生产工序间协调生产存在的问题

通过对钢铁工艺规程的分析，可以知道炼钢、连铸生产过程要求同一炉次、浇次生产的板坯钢种相同，规格相近，属于大批量少规格的生产过程。而热轧生产过程属于小批量多规格的生产过程，在一个轧制单元里钢种可以不同，对板坯宽度要求也是由宽到窄。例如，在炼钢过程中，要求生产的板坯重量达到转炉炉容的95%以上时才会开炉，当没有达到开炉要求时候，需要补充一些相同规格的板坯来满足生产要求，补充的板坯并不属于订单合同，这部分板坯叫做无委材。无委材在连铸出坯之后放入板坯库中，并不能直接进行轧制。由于连铸和轧制阶段生产约束的不同，连铸生产的板坯的规格并不能完全满足轧制生产工艺约束，连铸出坯一部分进行轧制，一部分放入板坯库。由以上的分析可知，在生产过程中，并不是每一单工序生产能力最大，就能满足总产能最大，另外，追求单工序产能最大，还会造成中间库存增多，热装热送率下降等不良影响。因此，在制定炼钢、连铸、热轧生产计划时候，不能孤立的考虑每一工序的最优计划，需要把三工序看作一个整体，充分考虑工序之间的衔接关系，使每一工序的生产计划既能满足本工序的生产约束，又能满足下一工序的生产需求，从而达到提高产能，降低库存，减少能耗的目的。

2 一体化生产计划问题模型体系结构

2.1 炼钢连铸热轧一体化生产计划模型结构体系

上文对炼钢、连铸、热轧各单工序生产特点及相邻工序间编制生产计划不能协调一致的原因进行了分析，为了解决上述问题，本文给出一体化生产计划编制模型结构，由6部分组成，如图2所示，分别为知识库子系统，炼钢子系统，连铸子系统，热轧子系统，炼钢连铸协调子系统，连铸热轧协调子系统组成。

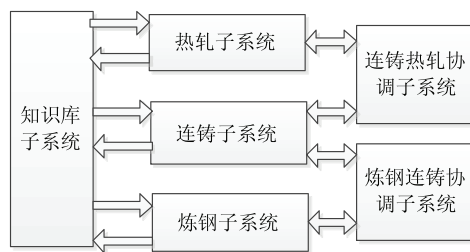


图2 炼钢-连铸-热轧一体化生产计划模型体系图

知识库子系统：提供用户订单，物料计划，机器生产能力，工艺规程等知识信息给炼钢、连铸、热轧子系统。包含炼钢连铸热轧一体化生产计划优劣评价的知识信息，能对最终输出的炉次计划、浇次计划、轧制计划进行综合评价，并能指导生产计划的调整。

炼钢子系统：由知识库子系统提供的周生产订单和转炉的生产能力等知识信息作为输入信息，考虑浇次计划的需求和炼钢工序的约束信息制定炼钢日计划及相应的炉次计划。炉次计划编制问题可以看作带有约束条件的背包装载问题。背包装载问题描述为给定一组物品，每种物品都有自己的重量和价格，在限定的总重量内，我们如何选择，才能使得物品的总价格最高。对应到炉次计划当中指的是转炉的炉容对应于背包的重量，订单的板坯重量对应于每个物品的重量，订单放入一个炉次计划中的惩罚费用对应于物品的价格。编制炉次计划的目的是满足炼钢生产的约束条件下，放入背包的订单重量多且惩罚费用少。炉次计划是一种组合优化的NP难问题，一般在约束满足的条件下，找到满意解。

连铸子系统：由知识库子系统提供的周生产订单和连铸机的生产能力等知识信息作为输入信息，考虑炼钢日计划和热轧日计划的需求制定连铸日计划及相应的浇次计划。浇次计划的编制，实质是对炉次进行组合排序。也可以归结为带约束条件的背包装载问题进行求解。其中间包寿命可看作背包的重量，每个炉次的生产订单量对应于每个物品的重量，炉次在一个浇次中的惩罚费用对应于物品的价格。编制浇次计划目标是一个浇次中炉次的数量尽可能多，且规格惩罚费用尽可能低。

热轧子系统：由知识库子系统提供周生产订单和轧机的生产能力等知识信息作为输入信息，考虑连铸日计划生产的板坯和板坯库的库存信息制定热轧日计划及相应的轧次计划。在以往的研究中已经证明，轧制计划可以归结为一个多旅行商问题，将N块板坯看做N个结点，M个轧制单元看做M个旅行商。轧制计划的目标是M个轧制单元完成N块板坯时候规格惩罚费用尽可能低。

炼钢连铸协调子系统：根据转炉、连铸机生产能力和生产需求，按照启发式策略对炉次计划和浇次计划进行调整，尽量平衡炼钢连铸工序的生产节奏，提高转炉、连铸机的机器利用率。

连铸热轧协调子系统：根据连铸机、轧机的生产能力和生产需求，考虑板坯库的库存，对浇次计划和轧次计划进行调整，让更多的连铸坯可以直接进行轧制，提高整个生产过程的热装热送率。

2.2 炼钢连铸热轧一体化生产计划编制策略

本文首先考虑相邻工序的生产需求，制定各工序生产初计划，然后考虑本工序的生产约束及优化目标，对

生产初计划进行调整，从而达到既能满足整体连续性生产的要求，又能满足各工序的生产要求，最终编制出合理的一体化生产计划。炼钢-连铸-热轧一体化生产计划编制流程如图3所示。

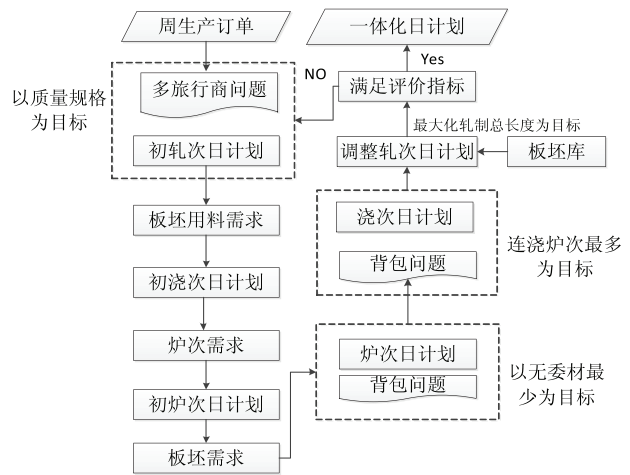


图3 一体化生产计划编制策略图

第一步：周生产订单作为输入，利用多旅行商问题求解模型，以质量规格惩罚费用最小为目标，制定初步的轧制日计划，满足轧制计划多规格的生产要求。

第二步：根据轧制日计划，可以统计出一天内m个轧制单元的板坯需求量，分别按照板坯的钢种和宽度对板坯进行分类统计。

第三步：根据统计的板坯作为轧制用料需求，把钢种作为硬约束条件，宽度作为软约束条件，制定初步的连铸日计划，尽量满足轧制计划的用料需求。

第四步：根据连铸日计划的浇次计划用料需求，制定初步的炼钢日计划，尽量满足连铸日计划的生产需求。

第五步：根据初步的炼钢日计划可以知道炉次计划需要的钢种、宽度规格要求的板坯的数量。

第六步：以满足初步炼钢日计划的板坯作为进行炉次计划的初始合同池，以无委材最少为目标，利用装箱问题求解模型，重新编制每日的炉次计划。

第七步：由上一步制定的炉次计划作为浇次计划编制的基本单位，利用装箱问题求解模型，以每个浇次的连浇炉次数量最多，重新制定浇次计划。

第八步：由上一步浇次计划的生产的板坯和板坯库的库存作为轧次计划需求用料，对初步制定的轧制日计划进行调整，得到新的日轧次计划。

第九步：判断此时的日炉次计划、日浇次计划、日轧次计划是否满足一体化评价指标，如满足评价指标，一体化生产日计划下发。如果不满足，重新初始化初步轧制计划，进行循环求解，直到满足评价指标，输出一体化生产日计划。

【下转第86页】

电机的转动是通过脉冲信号来控制的，伺服电机接收到1个脉冲信号就转动1个步进角，即 1.8° ，因此伺服电机的控制也就是控制发出的脉冲信号个数 X ，依据公式1可以计算出每个子程序段的固有脉冲信号个数 X ，不同编号木托盘所对应的脉冲信号个数如表3所示。

$$S_2 - S_1 = \frac{1.8X}{360} \times S \times 2 \quad (1)$$

S_2 为目标行程，不同编号木托盘夹持孔的长度方向距离；

S_1 为初始行程，为200mm；

X 为脉冲信号个数；

S 为丝杆螺母导程，所选用双向丝杆螺母副的导程为8mm。

3 结束语

木托盘上线机器人及其可控柔性夹具在现场调试过程中，控制程序和机器人结构运行平稳，满足了单线混产的需求，不仅可以完成10种木托盘的上线工序，还可以在木托盘外形尺寸一定范围内发生设计变更时，仅修改或增加子控制程序段即可满足需求。本设计不仅为客户节省了生产线建造成本，缩短了生产线混产停线时间，还便于客户依据市场变化修改优化产品设计，不断

表3 不同编号木托盘所对应的脉冲信号个数

木托盘编号	子程序编号N	目标行程 (mm)	脉冲信号个数X
1	1	500	3750
2	2	550	4375
3	3	600	5000
4	4	700	6250
5	5	750	6875
6	6	800	7500
7	7	900	8750
8	8	1000	10000
9	9	1100	11250
10	10	1200	12500

地提升产品市场竞争力。

参考文献:

- [1] 乌尔里希·森德勒.工业4.0:即将袭来的第四次工业革命[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [2] 吴瑞祥.机器人技术与应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,1994.
- [3] 贾侦华.一种新型四轴喷漆机器人及其控制系统的开发与研究[D],2005.
- [4] 顾震宇.全球工业机器人产业现状与趋势[J].机电一体化,2006(2).

【上接第83页】

3 结束语

本研究以某钢铁企业对炼钢连铸热轧一体化生产计划编制的需求出发，对各工序生产计划排程的特点进行分析，找出影响钢铁生产一体化排程关键原因，在以往对各工序单独排程研究的基础上，提出一种炼钢-连铸-热轧一体化生产计划编制的方法，通过炼钢连铸协调子系统和连铸热轧协调子系统对炼钢日计划、连铸日计划、轧制日计划进行协调，通过知识库子系统对一体化生产计划进行评价，最终得到合适可行的一体化生产计划，对钢铁企业一体化生产计划实践有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 王闯,刘青.基于改进单亲遗传算法的炼钢最优炉次计划模型[J].控制理论与应用,2013.6(6):734-742.
- [2] 杨凡.浇次计划编制的混合启发式-交叉熵算法[J].计算机集成制造系统,2014.20(9):2241-2247.

- [3] Park H, Hong Y and Chang S Y. An efficient scheduling algorithm for the hot roll making in the steel mini-mill. Production Planning & Control[J],2002,13(3):298-306.
- [4] 宁树实,王伟,潘学军.一种炼钢-连铸生产计划一体化编制方法[J].控制理论与应用,2007.24(3):374-379.
- [5] 赵珺,战洪仁.基于多智能体的连铸-热轧一体化生产调度模型[J].仪器仪表学报,2008.29(7):1540-1543.
- [6] 郑忠,刘怡.炼钢-连铸-热轧生产计划编制的统一模型及智能算法[J].北京科技大学学报,2013.35(5):687-693.
- [7] 马天牧,张蕾,胡国奋.冶铸轧一体化批量计划编制新技术[J].控制工程,2005.12(6):533-537.
- [8] 唐立新,杨自厚,沈宏宇,胡国奋.炼钢-连铸-热轧集成批量计划因素分析[J].钢铁,2000.35(5):74-76.
- [9] 李砚婷,闫宗明,张胤.炼钢-连铸-轧钢一体化计划的实现[J].宽厚板,2007.13(6):11-13.
- [10] 李铁克.基于约束满足的热轧批量计划模型与算法[J].控制与决策,2007.22(4):389-394.