

面向订单的钢铁企业生产管理一体化系统

蔡 洋 李铁克

北京科技大学经济管理学院, 北京 100083

摘要 在对钢铁企业信息化体系结构及生产管理模式等进行理论研究的基础上, 基于高级计划排程的思想, 提出了面向订单的钢铁企业一体化计划与调度系统的体系结构模型。针对一体化生产管理中的库存匹配问题, 建立了热轧带钢库存匹配模型; 针对一体化生产管理中的能力匹配问题, 建立了考虑钢铁生产加工工序约束和设备能力约束的能力计划模型。同时从订单排产和作业计划的角度研究了钢铁生产各主要环节的生产计划方法和调度策略, 及其整体上的相互关联。

关键词 钢铁企业; 订单; 生产管理; 计划排程

分类号 F 406.2

Integrated system for make-to-order production management in iron and steel enterprises

CAI Yang, LI Tieke

School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT After the discussion of information systems and production management modes, based on the advanced planning and scheduling theory a system architecture model of integrated steel production planning and scheduling was presented for make-to-order production management in iron and steel enterprises. In the model, an inventory matching model of hot rolling strips was established for the inventory matching problem of integrated production management, and a capability planning model which considered the constraints of working procedure in steel production processes and the constraints of equipment capacity was established for the capability matching problem of integrated production management. The production planning and scheduling methods and their whole relationship were researched from the points of view of available-to-promise and capacity-to-promise and production scheduling.

KEY WORDS iron and steel enterprises; order; production management; planning and scheduling

随着市场竞争日益激烈以及钢铁企业经营环境的变化和生产工艺的变革, 研究与开发适应面向客户的多品种小批量生产、符合现代钢铁生产流程特征的一体化生产计划与调度方法已经成为现代钢铁生产管理中亟待解决的课题。传统的钢铁生产企业所采取的生产方式通常是面向库存(make-to-stock)的批量生产, 生产计划与调度的焦点主要是设备利用率和产品产量, 在生产过程中产品与订单是脱节的; 而在现代钢铁企业中, 基于订单(make-to-order)的多品种、小批量生产正在成为主流, 生产计划与调度的焦点不仅是设备利用率和产量, 更要考虑在订

货阶段对客户交货期的回答、在生产执行阶段对订单完成状况的跟踪、针对质量偏差等进行及时地调整、对客户的特殊要求进行首尾一贯的个性化管理。同时, 炼钢—连铸—热轧的一体化生产工艺的出现, 对生产计划与调度的一体化管理和基于实时生产数据的动态调节能力提出了非常严格的要求。文献[1]提出的基于BPS/MES/PCS三层结构是流程工业现代集成制造系统实施一体化管理的基础; 文献[2]就一体化生产计划问题, 对钢铁生产发展趋势作了概述, 进而对钢铁生产计划问题的研究方向做出了有益的探讨; 文献[3]从制造执行系统的角度对钢铁企业生产管理信息化的体系结构进行了全面地分析和探讨。本文在这些研究的基础上, 着重研究钢铁生产全流程的一体化计划与调度的体系结构和关键模型。

收稿日期: 2006-12-08 修回日期: 2006-12-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 70371057)

作者简介: 蔡 洋(1972—), 男, 博士研究生; 李铁克(1958—), 男, 教授, 博士生导师

1 面向订单的一体化生产管理系统的体系结构

一体化生产管理涉及钢铁生产全流程, 系统涵盖了钢铁企业复杂的生产环境下进行生产计划与作业排程的需求, 使前后工序计划同步, 物流运行准时, 所有的模块都采用先进的基于约束的运算规则和优化算法, 以确定物料资源和生产能力的配置顺序。APS 高级计划和排程系统的计划过程是以订单为中心, 主要关注对最终物料的需求并确定能够在特定时期内满足多少需求, 也就是如何向各个工序(炼钢、连铸、热轧、冷轧)分配特定作业及其如何设定作业顺序。由于所包括的计划时间范围有可能出现中断, 预测可能不准确, 交货可能延迟, 设备可能发生故障, 还可能会收到无法预期的紧急订单, 因此可以将各台设备合计到各个工序内, 而不确定具体那一个订单使用哪台设备, 尤其是在瓶颈设备上进行处理之前, 从而能够允许可能发生的中断, 最终的结果是由具有能力和物料约束的计划模块产生一个“可排程”的计划。该计划将数据内容提供给排程模块, 排程模块生成一个详细的工序清单表, 显示将如何使用能力, 且将该信息返回给计划模块用于下一个计划期间, 由此向客户提供现实的承诺估计。

面向订单的一体化生产管理系统是从炼钢、炉外精炼、连铸到热轧和冷轧的详细的生产计划和作业排程能力, 它将生产率、生产成本、交货水平、板坯库存和热送热装与生产流程上的技术约束进行平衡。图 1 描述了一体化系统模型的体系结构。

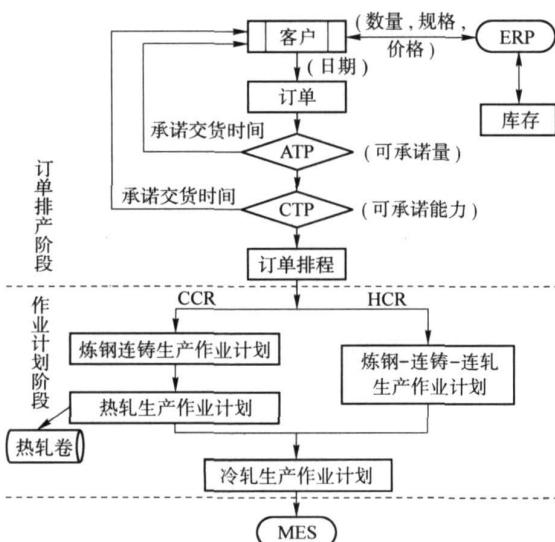


图 1 一体化生产管理系统的体系结构图

Fig.1 Integrated system framework of production management

2 一体化系统中的核心问题

一体化生产管理系统分成订单排产和作业计划两个阶段。订单排产阶段是把接受合同订单的明细, 整理为具体的生产批量, 是生产计划的组织阶段, 系统不仅考虑合同内容, 而且还要考虑各工序的约束条件、效率、库存、制造标准、交货期等, 做出目标最优的生产计划; 作业计划阶段是把生产计划按详细作业展开, 为此把各工序按时间序列细分, 计划延迟或工序发生异常时, 系统则进行实时的动态调整。

2.1 订单排产阶段

基于高级计划排程(APS)思想的一体化系统中, 计划功能用于确定在特定计划时间的范围内来满足制造系统的需求。对计划过程的输入内容包括与需求数据和制造能力相关的信息, 如客户订单、已下达的生产订单、安全库存的需求、物料清单、各个工序能力的可用性及零件工艺, 同时也考虑库存量、已计划交货量。计划过程的输出是一个可行性的计划, 每一个计划的最终物料订单都具有一个承诺日期, 该日期是通过订单可承诺量 ATP 和可承诺能力 CTP 确定的。

(1) ATP 库存匹配模型。库存匹配工作是生产计划编制前对订单的预处理过程, 它有利于提高产品的及时交货能力、解决库存造成资金和场地占用问题, 在钢铁等流程工业中普遍存在。本文假定订单已进行了拆分, 即每个订单只包含一种规格要求的产品。这样, 库存匹配问题可以简要描述为: 给定 N 个产品, M 个订单, 要求找出尽可能多的产品在满足规格、重量等约束的条件下与订单进行匹配, 使匹配的重量最大化。在产品与订单进行匹配时, 必须符合订单的规格要求。除了规格要求, 还要考虑同一个订单匹配的产品重量之和不得超过该订单所要求的重量。

为了便于建立数学模型, 首先定义相关符号: i 为订单序号, $i=1, 2, 3, \dots, M$, M 为订单总数; j 为产品序号, $j=1, 2, 3, \dots, N$, N 为产品总数; O_i 为订单 i 的重量; W_j 为产品 j 的重量; Ω_i 为符合订单 i 的规格要求的产品集合; X_{ij} 为 0 或 1, 若产品 j 与订单 i 匹配则其值为 1, 否则为 0。

利用上述符号, 可以将库存匹配 ATP 模型表述为:

$$\max \sum_{i=1}^M \sum_{j \in \Omega_i} W_j X_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^M X_{ij} \leq 1 \quad (2)$$

$$\sum_{j \in \Omega_i} W_j X_{ij} \leq O_i \quad (3)$$

$$X_{ij} \in (0, 1) \quad (4)$$

模型中,式(1)所描述的目标函数指与钢卷匹配的订单重量最大化,式(2)~(4)为其约束条件。式(2)表明每个产品最多只能与一个订单匹配,式(3)表明与同一个订单匹配的产品重量之和不得超过该订单要求的重量,式(4)表示变量的取值范围。

(2) CTP 能力匹配模型。ATP 模型意在最大限度地利用库存产品对客户订单需求做出及时和准确的反应,缩短交货提前期、降低库存水准。对在 ATP 系统中没有得到匹配的订单,需要通过能力匹配模型来进行排产,并根据排产结果给出交货期承诺。在该领域也有一些相关研究,例如文献[4]建立了合同计划编制的整数规划模型,提出了基于可重复自然数编码和三变异算子的遗传算法对模型求解;文献[5]对订单计划做了综合考虑劳动力成本的长期规划模型。钢铁生产的主要流程为炼钢—连铸—热轧—冷轧—镀锌等,在订单生产中,并非所有的产品都要经过所有工序的加工,最终产品可以是钢坯、热轧卷、冷轧卷、镀锌板等。因此在实际的订单生产中,可能包含多种产品类型。本文在考虑不同订单对加工工序的特殊要求的基础上,综合考虑了设备能力平衡、利用效率最大化和工序顺序约束,提出以交货期偏离惩罚最小为目标的单目标整数规划模型,订单排程计划应使所有的订单拖期/提前惩罚最小,并且满足设备能力约束和前后工序之间的时间约束。

钢铁企业的订单排产计划编制可概括为:给定 I 个订单、 K 种工序,每个订单的产品种类可能不同,每种产品要经过若干工序的加工;订单的拖期会导致拖期费用并使企业信誉下降,而订单的过早完成会导致库存费用的增加;由于钢铁生产工艺的特殊性,在生产过程中,工序之间存在着特殊的时间约束(例如,连铸和热轧工序之间最长不能超过一定的时间间隔,而热轧与冷轧之间则必须经过一定的冷却缓冲时间等),在本文中称之为最大等待时间和最小缓冲时间。钢铁企业的订单排产计划应使所有的订单拖期/提前惩罚最小,并且满足设备能力约束和前后工序之间的时间约束。

本文建立的基于能力约束的订单排程模型基于以下几点假设:(1)生产模式为订单交货期驱动型;(2)每道工序中的每台设备在一定时期内加工能力

一定并已知;(3)某种类型的产品在各个工序上加工时间一定并已知;(4)不单独考虑中间库存与订单分割;(5)前序工序的生产能力大于后继工序。除了设备能力因素,其他生产资源的限制不被考虑。

为了便于建立数学模型,相关符号定义如下: T 为对象生产周期,所有订单都在时间段 T 内完成; i 为订单序号 $i=1, 2, \dots, I$, I 为定期内的订单总数; n 为工序序号, $n=1, 2, \dots, N$, N 为工序总数; x_{in} 为订单 i 在设备 n 上的开工时间; t_{in} 为订单 i 在设备 n 上的加工时间; b_n 为工序 n 与 $n+1$ 之间的最小缓冲时间; g_n 为工序 n 与 $n+1$ 之间的最大间歇限制; d_i 订单 i 的交货期; C_n 为工序 n 的设备加工能力(一定时期的的最大工时),在本模型中认为 $C_n < C_{n-1}$; α 、 β 分别为提前和拖期惩罚系数, $\alpha < \beta$ 。

利用上述符号,可以将 CTP 能力匹配模型表述如下:

$$\min F(x_{ik}) = \beta \sum_{i=1}^I \max[0, (x_{ik} + t_{ik} - d_i)] + \alpha \sum_{i=1}^I \max[0, (d_i - x_{ik} - t_{ik})] \quad (5)$$

S.T.

$$\sum_{i=1}^I t_{in} \leq C_n \quad (6)$$

$$x_{in+1} - x_{in} \geq b_n \quad (7)$$

$$x_{in+1} - x_{in} \leq g_n \quad (8)$$

$$i=1, 2, \dots, I; n=1, 2, \dots, N.$$

目标函数(5)是最小化所有的订单提前/拖期总惩罚值,式(6)~(8)为其约束。约束(6)保证一定时期内所有订单的相应产品在相应设备上的加工工时不超过该设备在此时期的加工能力,约束(7)和(8)保证工序间的缓冲。由于钢铁生产过程的特殊性,对于一种产品的加工,后继工序可能必须在前序工序完成并进行一定的缓冲后方可开工,此种情况适用约束(7);也有可能后继工序与前序工序之间不能超过一定的时间间隔,此种情况适用于约束(8)。

2.2 作业计划阶段

基于 APS 思想的一体化系统中计划排程模块的作用是生成工序的详细作业排程清单,以指定何时在哪道工序上处理哪个订单。系统的计划排程功能是以订单为中心并由事件驱动的,在一组订单及其相关开始日期已经确定的情况下,由计划排程模块算法生成时间顺序列,即一个包含每个订单首道工序的时间顺序列表;因为该工序能够获得它所需

要的设备能力和物料,因此将更新该时间序列反映工序结束的时间。随着时间的推移每个订单都会完成其路径,其截止日期取决于系统的动态设置情况。订单在系统中经过的最终结果是一个详细的时间表。

(1) CCR——冷装工艺:炼钢—连铸生产调度。一般意义上炼钢—连铸生产调度问题可以抽象为混合(hybrid)流水车间的作业排序问题,此类问题已被证明是NP-难题。炼钢—连铸生产调度需要协调冶炼、精炼和连铸三个作业工序的生产节奏,在满足对钢水温度和时刻的要求、保证生产持续性的前提下,充分利用有限的设备资源^[6]。

炼钢—连铸作业计划问题可以归结为一个混合整数规划模型,其目标为最小化浇次的断浇次数和炉次的等待时间。由于各种变量数目巨大,因此直接对模型进行求解是困难的。文献[7]将此问题分解为两个子问题,先探讨炉次设备指派的策略,为炉次指派设备、生成粗调度后,再用一个线性规划模型来确定各炉次最终的开始处理时间,以解消可能存在的设备冲突。

(2) CCR——冷装工艺:热轧生产调度。轧制批量计划的编制,主要有两种解决方案:一是采用基于旅行商(TSP)模型的串行策略;这种方法动态性虽强,但结果可能是局部最优而非全局最优。二是采用基于车辆路径问题(VRP)模型的并行策略;这种方法计算虽然复杂,却能保证整个轧制计划全局最优。

轧制阶段的批量计划(轧批)的主要约束在于宽度和厚度:宽度必须按规则变化(双梯形结构);厚度必须平滑变化。其目标是:(1)保证产品厚度方面的跳跃最小;(2)保证产品宽度方面的跳跃最小;(3)整个批量计划包含的板坯数应尽可能多。考虑到编制轧制计划时,并非一次将所有板坯编排完,调度员首先向系统输入需要编制的轧制计划数,然后由计算机根据资源状况和约束条件从板坯库中选出板坯进行组批和排序,因此将问题归结为确定车辆数的车辆路径问题^[8]。

(3) HCR——热装热送:炼钢—连铸—热轧一体化的生产调度。基于炼钢—连铸生产调度模型、热轧生产工艺、板坯和炉次对应关系及JIT思想建立的一体化生产调度模型须满足以下条件:(1)批量计划(炉次和轧制单元)已编制;(2)不改变子调度前后顺序;(3)每台轧机同时只能加工一块板坯。

炼钢—连铸—热轧一体化生产系统的调度问题实质是在批量计划(炉次、浇次和轧制计划)的基础

上,以炉次(或板坯)为最小计量单位,追求某一评价函数最佳情况下一类多工件、多工序、多机的特殊的Job-shop排序问题。其目标为板坯提前和拖期惩罚费用(保证板坯准时交货)、连轧断开损失惩罚费用(保证同一轧制单元中的板坯连轧)、板坯等待处理时间的惩罚费用等四个部分的总费用之和最小。炼钢—连铸生产调度模型是以炉次为最小单位,而热轧生产调度是以板坯为最小单位。为便于求解,采用了拉格朗日松弛法对模型分解,使原调度问题分解为两层优化,上层优化拉格朗日乘子,下层用动态规划求解子问题,使求解得到很大简化^[9]。

(4) 冷轧:冷轧产品(宽带冷轧板、镀锌板、彩涂板等)是钢铁企业的高附加值产品,其生产过程具有多产品、多流向等复杂物流特征。为保证生产线连续运行,需要对存在着复杂供料关系的上下游机组之间的工料关系进行有效地协调。由于设备使用状况、工艺限制、库存容量以及初始库存量等诸多因素的影响,冷轧生产作业计划的编制以及物流控制是钢铁企业生产计划与调度领域的重点和难点问题,目前多数企业仍采取人工判断和调整方法进行冷轧生产的组织和管理。

冷轧生产作业实现均衡生产和优化生产计划与调度控制很困难。这是因为冷轧生产线既有串行生产线的均衡生产问题,也有离散生产的排产与调度问题;它既要协调各车间机组的排产作业计划,降低酸洗冷轧联合机组切换频率,也要保证连续生产前提下降低酸洗冷轧联合机组和后续机组的中间库存;它不仅涉及到冷轧企业内部的优化运作模式,而且还存在与上游热轧间的协同计划问题;其复杂性还体现在既有离散计划调度的复杂度,还有流程企业对实时性的要求。

因此,根据冷轧生产系统中原料种类繁多,工艺路线复杂,且同时须兼顾设备和工艺限制等约束条件的特点,认为建立面向订单的、确保生产连续运行的、能够降低酸洗冷轧联合机组切换频率和中间库存水准的计划模型,是冷轧生产计划管理的关键。

3 结论

本文在对钢铁企业信息化体系结构及生产管理模式等进行理论研究的基础上,针对钢铁企业生产的具体特点,提出了面向订单的钢铁企业一体化生产管理模式和体系结构。采用基于APS高级计划排程的思想来构建现代钢铁生产过程中面向订单的一体化生产管理系统和解决方案。同时分析了钢铁企业生产流程各阶段的先进生产计划方法和动态实

时调度策略。为进一步展开研究,开发能够应用于钢铁生产实际的实用算法提供了系统框架和理论基础。

参 考 文 献

- [1] Zheng B L, Hu K Y, Chang C G. Status and expectation of research on integrated planning for steel production. *Control Eng China*, 2003, 10(1): 6
(郑秉霖,胡琨元,常春光.一体化钢铁生产计划系统的研究现状与展望.控制工程,2003, 10 (1) : 6)
- [2] Chai T Y, Jin Y H, Ren D X, et al. Contemporary integrated manufacturing system based on three-layer structure in process industry. *Control Eng China*, 2002, 9(3): 1
(柴天佑,金以慧,任德祥,等.基于三层结构的流程工业现代集成制造系统.控制工程,2002, 9(3): 1)
- [3] Li T K, Zhang W X, Cui J S. The system framework of manufacturing execution systems in iron and steel enterprises. *Metall Ind Autom*, 2003, 27(4): 18
(李铁克,张文新,崔建双.钢铁企业制造执行系统的体系结构.冶金自动化,2003, 27(4): 18)
- [4] Zhang T, Wang M G, Tang L X, et al. The method for the order planning of the steel plant based on the MTO management system. *Control Decis*, 2000, 15(6): 649
(张航,王明国,唐立新,等.基于MTO管理系统的钢厂合同计划方法.控制与决策,2000, 15(6): 649)
- [5] Brain D N, George G P, Nada R S. A hierarchical production plan for a make-to-order steel fabrication plant. *Prod Plann Control*, 2004, 15(3): 324
- [6] Tang L X, Yang Z H, Shen H Y, et al. Analysis of modeling factor of integrated lot planning for SM-CC-HRM. *Iron Steel*, 2000, 35(5): 74
(唐立新,杨自厚,沈宏宇,等.炼钢—连铸—热轧集成批量计划因素分析.钢铁,2000, 35(5): 74)
- [7] Zhu B L, Yu H B. Production scheduling model and algorithm for steelmaking-continuous casting-hot rolling processes. *Comput Integr Manuf Syst*, 2003, 9(1): 33
(朱宝琳,于海斌.炼钢—连铸—热轧生产调度模型及算法研究.计算机集成制造系统—CIMS, 2003, 9(1): 33)
- [8] Li T K, Cai Y, Xiao Y J. Model and algorithm for CSP rolling batch planning // *ICIM'2004 Proceedings of the Seventh International Conference on Industrial Management*. OkaYana, 2004, 215
- [9] Liu G H, Li T K. A steelmaking-continuous casting production scheduling model and its heuristic algorithm. *Syst Eng*, 2002, 20 (6): 44
(刘光航,李铁克.炼钢—连铸生产调度模型及启发式算法.系统工程,2002, 20(6): 44)

(上接第 275 页)

- [3] Zhang Q X, Zhao Q S. *Metallurgy of Tungsten and Molybdenum*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005
(张启修,赵秦生.钨钼冶金学.北京:冶金工业出版社,2005)
- [4] Ma Y Z, Huang B Y, Fan J L, et al. the sintering characteristic of compound powder of nanoscale 90W-7Ni-3Fe. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2004, 14(8): 1382
(马运柱,黄伯云,范景莲,等.纳米级 90W-7Ni-3Fe 复合粉末的烧结特性.中国有色金属学报,2004, 14(8): 1382)
- [5] Zhao F, Lin T, Zhang L Y, et al. sintering characteristic and mechanical property of supergrain W-40%Cu alloy. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2005, 27(5): 578
(赵放,林涛,张丽英,等.超细晶粒 W-40%Cu 合金的烧结和力学性能.北京科技大学学报,2005, 27(5): 578)
- [6] Lin T, Zhao F, Zhang L Y. Fine grain tungsten produced with nanoscale powder. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2005, 12(3): 277
- [7] Sun L, Jia C C, Cao R J, et al. The sintering present state and perspectives of nanoscale powder. *Powder Metall Technol*, 2006, 24(2): 147
(孙兰,贾成厂,曹瑞军,等.纳米粉末烧结的研究现状与前景.粉末冶金技术,2006, 24(2): 147)
- [8] Lei Y, Xiong W H. The sintering perspective of nanoscale ceramic materials. *Mater Res*, 2003, 17(5): 28
(雷燕,熊惟皓.纳米陶瓷材料烧结研究进展.材料导报,2003, 17(5): 28)
- [9] Zhang F L, Wang C Y, Song Y X, et al. The sintering advance of nanoscale block materials. *Hard Alloys*, 2002, 19(3): 177
(张凤林,王成勇,宋月贤,等.纳米块体材料烧结技术进展.硬质合金,2002, 19(3): 177)
- [10] Lu G F, Hao J J, Guo Z M. Synthesis of nanosized tungsten powder. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2005, 5(12): 43
- [11] Lin T, Zhang L Y, Zhao F, et al. The hypothermia sintering characteristics of nanoscale tungsten compact. *Mater Mech Eng*, 2006, 30(5): 91
(林涛,张丽英,赵放,等.纳米钨粉坯的低温固相烧结特征.机械工程材料,2006, 30(5): 91)
- [12] Yin S X. *The Production Principle, Technology and Performance of Tungsten Filament*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998
(印世协.钨丝的生产原理、工艺及其性能.北京:冶金工业出版社,1998)