

炼钢热轧一体化生产与物流计划模型及求解^①

罗治洪, 唐立新

(东北大学物流优化与控制研究所, 沈阳 110004)

摘要: 合理的板坯与热轧卷库存、缩短产品的生产周期、降低能源消耗、按合同交货以提高客户满意度已成为钢铁生产管理的要求。为了降低生产与物流成本, 本文针对炼钢与热轧生产及其衔接方式的特点, 考虑能力和两个阶段冲突约束条件下构建生产与物流计划层次的一体化模型。分析了无能力约束和允许延迟条件下热轧批量的极点特征, 对原问题采用 Dantzig-Wolfe 分解和集划分相结合的方法进行等价变换。采用列生成获得下界, 同时使用启发式方法求得初始可行解并采用分支定界进一步提高可行解的质量。对随机算例进行了分析和比较, 计算结果表明算法能够获得较满意的解, 同时, 成本结构的分析说明提高热装比和在生产与物流之间均衡的必要性。

关键词: 一体化; 生产与物流; 列生成

中图分类号: F272 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2011)06-0016-08

0 引言

钢铁工业中的炼钢和热轧是资金密集、能耗高、时间紧凑的生产与物流阶段, 见图 1。20 世纪 80 年代以来, 随着板坯向轧制阶段热装和一体化生产技术的发展, 以及供应链管理思想的提出, 控制中间产品(板坯)和成品(热轧卷)的库存、缩短产品的生产周期、提高成材率和降低物料损失、降低能源消耗、尽量按合同交货以提高客户的满意度、降低生产与物流成本已成为钢铁生产管理的要求。

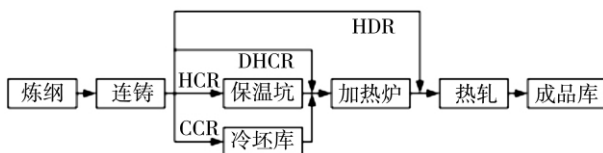


图 1 炼钢热轧生产与物流

Fig. 1 Production and logistics in steel making and hot rolling

目前, 各阶段按需求进行批量生产是生产计划制定的主要方式, 即热轧根据产品的订货需求

安排计划并向炼钢提出板坯需求, 炼钢根据热轧订单制定生产计划。然而这种生产模式受到了限制。

首先, 炼钢是按炉次的方式组织生产的, 一个炉次重量为 300(或 250) t 左右, 炉次内的钢水成分决定了该炉次为下游提供产品的钢级, 钢水经过连铸加工成 10-30t 的板坯; 其次, 热轧面临的订单需求具有数量与钢级的要求, 订单的数量大小不等; 再次, 具有能力的限制(如两阶段生产能力、辊道运输的时间限制和能力)。这些原因造成了在实际生产中无委托板坯或者是热轧阶段的延迟生产甚至不得不提升钢级来满足客户的需求, 无委托板坯通常要存放在板坯库中等待下一个计划安排加工而使得库存增加和资金占用, 延迟生产意味合同不能按期交货和客户的满意度下降且可能带来惩罚。因此, 尽量避免部分钢级的板坯在冷坯库积压和热轧的延迟生产是生产管理的重要

① 收稿日期: 2010-10-06; 修订日期: 2011-04-20.

基金资助: 国家自然科学基金资助重点项目(71032004).

作者简介: 罗治洪(1976-), 男, 四川攀枝花人, 博士生, 讲师. Email: kmustlzh@yahoo.com.cn

内容.

从两阶段连接来看, 炼钢向热轧运输的方式有热装 HDR、DHCR、HCR 和冷装 CCR. HDR 为高温状态下直接轧制, 应用较少本文不予考虑. DH-CR 为高温下直接热装进入加热炉, 因此这类板坯从连铸下线后经过几个小时就可进入热轧. HCR 为经过保温坑的热装方式, 这类板坯通常经过十几个小时进入热轧, 板坯在保温坑里存放时间过长是不经济的. CCR 为冷装方式, 根据热轧生产的需要从冷坯库进入加热炉. 可见, DHCR、HCR 和 CCR 在运输中的能源消耗和生产准备时间是由低到高的. 热轧要求板坯尽量能够以热装的方式进入生产以节省能源消耗. 各种方式的比较见文献^[1]. 可见, 板坯进入热轧的方式决定了不同时间的板坯库存水平和能量的损失和再消耗(加热), 同时影响着产品的生产周期以及生产与物流成本. 目前, 提高板坯热装的比例, 使板坯尽量以高温状态进入热轧已经成为生产管理中实施 JIT 的要求之一.

一体化的运作管理要求多个阶段能够同步进行协调生产, 使多阶段的计划决策像一个集成系统一样有效运作从而降低生产与物流成本. 因此, 研究这两个阶段的一体化的生产与物流计划的方法非常有必要. 本文研究以班次为单位的计划问题. 对计划展望期进行合理的划分是关键, 划分为较长的时间单位(如天、周)等, 无法体现出热装和冷装方式的差别, 而划分成更短单位(如小时)的话, 变量的个数可能无法接受, 另外, 每个炉次的生产时间在几十分钟内完成, 在如此短的时间段内的生产计划意义不大, 更适合在调度层次上解决涉及到对炉次和板坯的生产排序问题, 这些问题不在本文考虑之列.

本文建立了炼钢与热轧一体化生产物流计划的混合整数规划模型, 目标是极小化的生产与物流成本. 采用集划分与 Dantzig-Wolfe 分解相结合的方法对原问题进行等价变换获得主问题与子问题. 炼钢子问题可以描述为整数背包问题, 而热轧子问题描述为允许延迟生产的批量问题. 主问题包含板坯的库存(这里把保温坑也看成了一种仓库)平衡及板坯对热装或冷装方式的选择. 用列生成求解主问题的线性松弛获得下界, 根据下界

采用启发式与线性规划相结合的方法尽快获得可行解, 同时采用启发式分支定界进一步提高可行解的质量.

1 文献综述

目前, 对供应链上一体化的建模理论与应用得到越来越多的关注. Shapiro 对此进行了较为全面的总结^[2]. Stadler 从概念框架上阐述了供应链模型、其基础和高级规划的实施^[3]; Erengüç 等指出了制造与配送计划进行集成的必要性, 客户需求多样化和质量要求是对供应链成本进行均衡的动力之一^[4]. 从供应链计划矩阵(supply chain planning matrix)的角度, Maravelias 和 Sung 提出了供应链计划与调度的一般性模型^[5]. Hoesel 等建立了供应链上集成制造、库存和运输的数学模型以解决批量决策问题, 分析极点的特征和子计划的性质并扩展到多阶段生产的情况^[6]. 鲁其辉等分析了单个供应商和单个制造商的供应链环境下双方成本共担的一体化策略能够改进产品质量和信息质量^[7]. Bredstrom 等研究了在造纸工业上的供应链一体化计划问题, 建立数学模型以对日常计划进行决策, 通过对解的分析和与人工计划的比较, 提出了降低成本的策略^[8]. Ouhimmou 等研究了家具行业的供应链上多阶段计划问题, 包括采购、库存、外包和需求的分配, 以降低供应链成本和提高其竞争力^[9]. 这些研究成果主要是基于供应链管理中的集成与一体化的思想, 用整个系统的最优来降低各个相对独立的子系统的冲突, 这也是本文模型建立的思想.

对钢铁炼钢和热轧的一体化来说, 目前的研究主要集中在调度, 其中代表性的成果有: 炼钢连铸和热轧的生产调度问题研究^[10-11]. 朱宝琳研究了炼钢热轧一体化的调度^[12-13], 实质是追求评价函数最佳情况下的一类多工件、多工序、多机的 Job Shop 排序问题以降低作业管理的成本. 宋继伟等采用粒子群优化算法对轧辊热批处理调度问题进行求解, 根据仿真结果提出了提高设备利用率的参考策略^[14]. 炼钢连铸热轧集成批量的影响因素非常多, 较为复杂^[15], 而本文则从计划层次的角度进行建模, 与其它研究是不同的. 文献[1]

对钢铁工业的集成计划问题进行了总结并就未来研究的关键技术与理论进行了展望.

2 数学模型

2.1 符号说明

在一体化的生产与物流计划中,需用做出以下决策:1) 每个班次生产钢水的炉数和钢级;2) 每个班次不同等级的热轧卷是否进行生产及产量;3) 板坯在板坯库以及保温坑的库存水平;4) 热轧卷在成品库的库存水平;5) 板坯在每个班次以 DHCR、HCR 和 CCR 三种方式向热轧阶段的分配数量.先定义如下符号.

1) 下标. i 为钢级,总共有 I 种. t 为计划时间段,即班次,计划展望期为 T . m 为从炼钢到热轧的运输方式,分为 DHCR、HCR、CCR 三种.

2) 能力. C_t^S 为班次 t 的炼钢生产能力. f_u^S 为一个炉次的产量. C_t^R 为热轧的班次生产能力. C_t^B 为加热炉的容量能力. C_t^{DHCR} 为 DHCR 的能力. C_t^{HCR} 为 HCR 的能力.

3) 生产参数. sp_i 为热轧阶段生产钢级为 i 的单位产品对能力的占用. st_{it} 为炼钢阶段一炉钢水 i 对能力的占用. L^c 表示板坯在 CCR 方式下的生产准备时间. L^H 表示板坯在 HCR 方式下的生产准备时间. DHCR 方式下的生产准备时间在一个班次内,因此近似为 0.

4) 需求. d_{it} 为钢级为 i 的热轧卷在班次 t 的需求量. $sd_{i,1,T}$ 表示计划展望期内的累积需求.

5) 成本. c_{it}^S 表示一炉钢级为 i 的钢水在班次 t 的生产成本. c_{im}^O 表示按照方式 m 流出炼铁阶段的成本(热量损失和运输费用). c_{im}^I 表示按照方式 m 进入加热炉的成本(加热所需的能耗). h_u^C 为冷坯库的单位库存费用. h_u^H 为保温坑的单位库存费用. $h_u^H > h_u^C$. cp_u^R 为热轧阶段的生产可变成本. cs_u^R 为热轧的生产固定成本. h_u^R 表示热轧产品的单位库存成本. b_u^R 热轧延期生产引起的损失.

6) 决策变量. 主要包括: x_{it}^S 表示班次 t 生产钢级 i 的炉数,为整数变量. y_{it} 为 0-1 变量, 1 表示热轧阶段在班次 t 生产钢级为 i 的产品; 0 为不生产. x_{im} 为班次 t 内从炼钢阶段分别以 DHCR ($m = 1$),

HCR ($m = 2$), CCR ($m = 3$) 三种方式的流出量. y_{im} 表示以方式 m ($m = 2, 3$) 进入加热炉的流入量. h_u^C 表示冷坯的库存水平. l_u^H 为保温坑的库存水平. x_{it}^R 表示热轧的产量. l_{it}^{R+} 为成品的库存水平. l_{it}^{R-} 表示热轧卷的延期生产量.

2.2 数学模型

$$P: \text{Min } \sum_i \sum_t c_{it}^S x_{it}^S + \sum_i \sum_t \sum_m c_{im}^O x_{im} + \sum_i \sum_t \sum_{m=2,3} c_{im}^I y_{im} + \sum_i \sum_t (h_u^H l_{it}^H + h_u^C l_{it}^C) + \sum_i \sum_t (cs_{it}^R y_{it} + cp_{it}^R x_{it} + h_{it}^R l_{it}^{R+} + b_{it}^R l_{it}^{R-}) + \sum_t st_{it} x_{it}^S \leq C_t^S, \forall t \tag{1}$$

$$f_u^S x_{it}^S - \sum_m x_{im} = 0, \forall t, \forall i \tag{2}$$

$$\sum_t x_{it,1} \leq C_t^{DHCR}, \forall t \tag{3}$$

$$x_{it,2} + l_{it,1}^H - y_{it,2} - l_{it}^H = 0, \forall t, \forall i \tag{4}$$

$$\sum_t (y_{it,2} + y_{it,3}) \leq C_t^{HCR}, \forall t \tag{5}$$

$$x_{it,3} + l_{it,1}^C - y_{it,3} - l_{it}^C = 0, \forall t, \forall i \tag{6}$$

$$\sum_t x_{it,1} + \sum_{\tau=t-L^H}^t \sum_{\tau=t-L^C}^t y_{it,2} + \sum_{\tau=t-L^C}^t \sum_{\tau=t-L^C}^t y_{it,3} \leq C_t^B, \forall t \tag{7}$$

$$x_{it,1} + y_{it-L^H,2} + y_{it-L^C,3} - x_{it}^R = 0, \forall t, \forall i \tag{8}$$

$$\sum_t sp_{it} x_{it}^R \leq C_t^R, \forall t \tag{9}$$

$$x_{it}^R \leq sd_{i,1,T} y_{it}, \forall t, \forall i \tag{10}$$

$$x_{it}^R + l_{it}^{R-} + l_{it-1}^{R+} - l_{it}^{R+} - l_{it-1}^{R-} = d_{it}, \forall t, \forall i \tag{11}$$

$$x_{it}^S \geq 0 \text{ 且 } x_{it}^S \in Z, y_{it} \in \{0, 1\}, \text{ 其他变量非负} \tag{12}$$

目标函数为极小化生产与物流成本. 主要包括生产成本、板坯(包括保温坑)库存成本、热轧库存成本、运输与热量损失与消耗成本(与进入热轧阶段的方式相关). (1) 为炼钢阶段生产能力限制; (2) 为炼钢阶段的产品板坯有三种流向; (3) 为 DHCR 的能力限制; (4) 为保温坑的库存平衡; (5) 为 HCR 能力限制; (6) 为冷坯库的库存平衡; (7) 为加热炉的能力限制; (8) 为每个班次进入热轧的板坯与热轧加工量相等; (9) 为热轧的加工能力限制; (10) 为热轧阶段产量与启动变量之间的关系; (11) 为热轧卷的库存平衡; (12)

为变量限制.

3 模型的求解

3.1 等价变换

上述模型包含了两个阶段的计划决策. 求解比较困难, 原因在于前后两个阶段在能力约束下均为 NP-hard 问题, 单一阶段的最优决策对于另一个阶段不一定最优, 甚至不可行. Dantzig-Wolfe 分解与集划分是两种常见等价变换的方法, 其基本原理分别见文献^[16-18]. 本文对炼钢阶段, 采用集划分, 对热轧阶段结合这两种方法对原问题进行等价变换.

定义符号: Q^i 表示 $Conv(X^i)$ 的极点集, 其中 $X^i = \{(x_{iu}, y_{iu}, l_{iu}^+, l_{iu}^-) \mid \text{satisfy (10) ~ (12)}\}$, 因此, 对 $v \in Q^i$, 可以表示为 $(x_{iu}^v, y_{iu}^v, l_{iu}^{+v}, l_{iu}^{-v})$. 热轧启动序列集 $P^i = \{(y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{it}) : y_{iu} = 0 \text{ or } 1, \forall t\}$. $Conv(X^i)$ 实质是无能力约束下允许延期生产的单产品批量问题的凸包. Pochet and Wolsey 描述了这类问题的极点表达形式^[19], 即存在部分极点满足 $y_{iu} = 1$ 而 $x_{iu} = 0$. 因此, 可以把 Q^i 划分为两类: $Q^{iZ} = \{v : v \in Q^i \text{ and if } y_{iu}^v = 1, \text{ then } x_{iu}^v > 0, \forall t\}$ 和 $\overline{Q^{iZ}} = Q^i \setminus Q^{iZ}$. 有如下性质.

性质 1 任一极点 $v \in \overline{Q^{iZ}}$, 一定存在着一个极点 $v' \in Q^{iZ}$ 满足: $(x_{iu}^{v'}, l_{iu}^{+v'}, l_{iu}^{-v'}) = (x_{iu}^v, l_{iu}^{+v}, l_{iu}^{-v})$

证明 $v \in \overline{Q^{iZ}}, \exists \tau$ 满足 $y_{it}^v = 1, x_{it}^v = 0$ 则令 $y_{it}^{v'} = 0$. 且 $y_{iu}^{v'} = y_{iu}^v, \forall i \neq \tau$. 当 $y_{iu}^{v'}$ 确定后, 根据 Zangwill 单产品无能力约束且允许延期生产交货的批量问题的最优性^[20-21], 则 $(x_{iu}^{v'}, l_{iu}^{+v'}, l_{iu}^{-v'})$ 被唯一确定, 则 $v' \in Q^{iZ}$ 且 $(x_{iu}^{v'}, l_{iu}^{+v'}, l_{iu}^{-v'}) = (x_{iu}^v, l_{iu}^{+v}, l_{iu}^{-v})$. 证毕.

性质 2 任一可行热轧计划, 如果其生产启动序列为 $q \in P^i$, 则该计划的产量可由 Q^{iqZ} 中极点的产量的凸组合表示. 其中 $Q^{iqZ} = \{v : v \in Q^{iZ} \text{ and } y_{iu}^v \leq y_{iu}^q\}$.

证明 任意一个可行热轧计划, 其对应的产量为 x_{iu}^q . 根据凸多面体理论, X^i 是有界的, 则 $x_{iu}^q = \sum_{v \in Q^i} \alpha_v x_{iu}^v, y_{iu}^q = \sum_{v \in Q^i} \alpha_v y_{iu}^v$ 且 $\sum_{v \in Q^i} \alpha_v = 1, 0 \leq \alpha_v \leq 1$. 当 $y_{iu}^q = 1$ 则有 $\alpha_v = 0 (y_{iu}^v = 0)$; 当 $y_{iu}^q = 0$ 则有

$\alpha_v = 0 (y_{iu}^v = 1)$. 当 $\alpha_v > 0$ 且 $\exists \tau$ 满足 $y_{it}^v = 1, x_{it}^v = 0$ 根据性质 1, 一定存在一个 $v' \in Q^{iZ}$, 其产量与 v 一致. 即 $x_{iu}^{v'} = x_{iu}^v$. 证毕.

性质 1 描述了极点之间的关系, 性质 2 说明可用部分极点构造可行解.

令 P^t 表示炼钢阶段计划班次 t 的可行解集, 对 $p \in P^t$ 可表示为 $(x_1^p, x_2^p, \dots, x_i^p, \dots, x_j^p)$. 令 $c_{iv} = \sum_i c p_{iu}^R x_{iu}^v + h_{iu}^R l_{iu}^{+v} + b_{iu}^R l_{iu}^{-v}, \epsilon_{ip} = \sum_i c_{iu}^S x_i^p, \epsilon_{iq} = \sum_i c s_{iu}^R y_{iu}^q$. 根据性质 1 和 2, 对原问题进行等价变换, 得如下主问题 MP (master problem)

$$\text{Min } \sum_i \sum_t \sum_m c_{im}^O x_{im} + \sum_i \sum_t \sum_{m=2}^3 c_{im}^I y_{im} + \sum_i \sum_{p \in P^t} z_{ip}^S \epsilon_{ip} + \sum_i \sum_{q \in P^i} (z_{iq}^R \epsilon_{iq} + \sum_{v \in Q^{iqZ}} \alpha_v c_{iv}) + \sum_i \sum_t (h_{iu}^H l_{iu}^H + h_{iu}^C l_{iu}^C)$$

s. t. (3) ~ (7)

$$\sum_{p \in P^t} f_{iu}^S x_i^p z_{ip}^S - \sum_m x_{im} = 0, \forall t, \forall i \tag{13}$$

$$\sum_{p \in P^t} z_{ip}^S = 1, \forall t \tag{14}$$

$$x_{i1} + y_{i1-L^H} z_2 + y_{i1-L^C} z_3 - \sum_{q \in P^i} \sum_{v \in Q^{iqZ}} x_{iu}^v \alpha_v = 0, \forall t, \forall i \tag{15}$$

$$\sum_i \sum_{q \in P^i} \sum_{v \in Q^{iqZ}} s p_{iu} x_{iu}^v \alpha_v \leq C_t^R, \forall t \tag{16}$$

$$\sum_{q \in P^i} z_q^R = 1, \forall i \tag{17}$$

$$\sum_{v \in Q^{iqZ}} \alpha_v = z_{iq}^R, \forall q \in P^i, \forall i \tag{18}$$

$z_{ip}^S, z_{iq}^R \in \{0, 1\}, 0 \leq \alpha_v \leq 1$ 其它变量非负. (19)

模型中 $z_{ip}^S = 1$ 表示班次 t 的炼钢计划 p 被选择. $z_{iq}^R = 1$ 表示钢级为 i 的热轧启动序列 q 被选择. 约束 (13) (15) (16) 分别与 (2) (8) (9) 等价. (14) 与 (17) 为集划分约束, 而 (18) 为凸组合约束. 当松弛其中的 0-1 变量, 用 $\sum_{v \in Q^{iqZ}} \alpha_v$ 替换 z_{iq}^R 并消除 (18), 则线性规划的最优解为原问题的下界.

3.2 子问题

在求下界的过程中, 根据线性规划的理论, 当检验数为负时, 新的变量 (列) 进入主问题则可以改进目标值. 这就是列生成的基本原理^[22-24], 因

此 构造如下两类子问题以提供所需的列

1) 炼铁阶段. 令 u_i, v_i 分别为约束 (13)、(14) 的对偶变量, 则构建子问题

$$SP^S(t) = \text{Min} \{ \sum_i c_i^S x_{iu} - \sum_i f_{iu}^S x_{iu} u_i - v_i \}$$

s. t. $\sum_i st_{iu} x_{iu} \leq C_i^S, x_{iu}$ 为非负整数. (20)

该问题为具有容量限制的整数背包问题, 可以通过伪多项式时间算法的动态规划求解^[25], 这类子问题共 T 个.

2) 热轧阶段. 令 $\delta_i, \gamma_i, \lambda_i$ 分别为 (15) ~ (17) 对应的对偶变量, 则构建子问题

$$SP^R(i) = \text{Min} \{ \sum_i cs_{iu}^R y_{iu} + \sum_i h_{iu}^R l_{iu}^+ + \sum_i b_{iu}^R l_{iu}^- + \sum_i (cp_{iu}^R + \delta_i - \gamma_i sp_{iu}) x_{iu} - \lambda_i \}$$

s. t. $(x_{iu}, y_{iu}, l_{iu}^+, l_{iu}^-) \in \text{Conv}(X^i)$ (21)

该问题属于基本经济批量问题^[26]的扩展, 可以用多项式时间算法的动态规划求解^[20-21]. 这类子问题共 I 个.

当所有的子问题均找不到具有负检验数的解时, MP 线性松弛求解结束.

3.3 初始上界

通过多阶段启发式的方法尽快获得可行解. 其基本思想为: 充分利用下界而得到的有用信息, 固定炼钢生产作为第二阶段的输入, 忽略第二阶段的固定成本. 主要步骤如下.

1) MP 线性松弛获得下界, 如果可行, 则获得最优解, 结束; 否则进行 (2) ~ (7).

2) 令第一阶段的剩余能力为 $C_i^{Su} = C_i^S, \forall t$.

3) 计算钢水需求总炉数. 根据下界, 计算

$$n^i = \left\lceil \sum_i \sum_{p \in P_i} x_i^p z_{ip}^S \right\rceil.$$

4) 令 $t = 1, \forall i$, 如果 $n^i > 0$:

$$\textcircled{1} x_{iu}^S = \left\lceil \sum_{p \in P_i} x_i^p z_{ip}^S \right\rceil, n^i = n^i - x_{iu}^S, C_i^{Su} = C_i^{Su} - st_{iu} x_{iu}^S;$$

② 如果 $\sum_{p \in P_i} x_i^p z_{ip}^S$ 不为整数, 且 $C_i^{Su} \geq st_{iu}$, 则

$$x_{iu}^S = x_{iu}^S + 1, \text{同时令: } n^i = n^i - 1, C_i^{Su} = C_i^{Su} - st_{iu};$$

③ $t = t + 1$, 直至 $t = T$.

5) 进行补足计算

① 令 $t = 1$;

② 令 $i = 1$, 如果 $n^i > 0$, 且 $C_i^{Su} \geq st_{iu}$, 计算 $k = \min\{\lfloor C_i^{Su}/st_{iu} \rfloor, n^i\}$, 则 $x_{iu}^S = x_{iu}^S + k$, 同时令 $n^i = n^i - k, C_i^{Su} = C_i^{Su} - st_{iu}k$; 直至 $i = I$;

③ $t = t + 1$ 进行上一步, 直到所有 $n^i = 0$.

6) 把 4)、5) 中得到的第一阶段的生产决策 (生产炉数) 作为第二阶段的原料, 忽略第二阶段的固定成本, 决策后一阶段的不同时间段的生产量, 并用线性规划求得最优解 Z_{UP} ;

7) 进行检查, 如果 $x_{iu}^R > 0 (\forall t, \forall i)$, 则 $Z_{UP} = Z_{UP} + cs_{iu}^R$. 最后 Z_{UP} 就是初始上界.

3.4 分支定界

MP 的线性松弛一般不会得到原问题的可行解, 因此采用分支定界的方法改进启发式上界. 这里对原问题变量进行分支, 可使解空间被划分得更均衡^[27], 即

$$1) x_{iu}^S = \sum_{p \in P_i} x_i^p z_{ip}^S, \forall t,$$

$$\forall i \rightarrow x_{iu}^S \geq \left\lceil \sum_{p \in P_i} x_i^p z_{ip}^S \right\rceil; x_{iu}^S \leq \left\lfloor \sum_{p \in P_i} x_i^p z_{ip}^S \right\rfloor.$$

$$2) y_{iu} = \sum_{q \in P_i} y_i^q z_{iq}^R, \forall t, \forall i \rightarrow y_{iu} = 0; y_{iu} = 1.$$

把分支约束加入到子问题而不是主问题. 对后一阶段 $y_{iu} = 0$ 则在子问题中设置 $cs_{iu}^R = M$ (极大的正数). 分支约束加入到子问题的好处在于不破坏子问题的结构及求解算法, 另外有可能比加入到 MP 中获得更好的下界^[27].

4 随机试验

4.1 问题设计

为了考察算法的有效性, 根据问题规模的影响因素 (I 与 T) 设计了 9 种问题, 每种算例为 20 个. 模型参数与数据如下设置:

1) 热装比 70%. 即 DHCR、HCR 能力之和占热轧总需求的 70%, 尽量与实际生产一致;

2) HCR 和 CCR 的热轧生产准备时间分别为 1 和 2 个班次;

3) 为保证问题有可行解, 每个计划班次内两阶段的生产能力、加热炉的能力均大于所有产品的总需求平均到计划班次内的数量即 $(\sum_i \sum_t d_{it})/T$;

4) 炼铁的生产能力转化为生产时间. 不同等级钢水炉次的炼铁生产时间与某公司一致, 为 30 ~ 40 min. 而热轧的生产能力用产量单位(t) 表示;

5) 一个炉次的产量为 300t;

6) 热轧卷需求数据随机产生, 钢级 i 在班次 t 的需求 d_{it} 都服从 [10 300] 上均匀分布.

算法分支规则设置为: 列生成结束后, 根据对分支变量的计算, 取真分数值最大者作为分支变量, 当与上整数差小于 0.5 时, 先分上整数支, 当与上整数差大于 0.5 时, 先分下整数支. 同时采用了分支变量的固定规则, 即当分支变量与上整数(下整数) 差小于 0.01 时, 固定该分支变量为上整数(下整数), 不分支, 这是一种启发式的方法. 分支定界过程采用深度优先搜索, 搜索节点控制在 2 000 个以内.

4.2 算法性能

在 WindowsXP 环境下, 用 CPU 为 P42.6G, 物理内存 1G 的计算机进行计算. 计算结果(平均值) 见表 1, 其中列出了在根节点得到的上下界、分支搜索获得的上界以及计算时间(s). 用 GAP 衡量解的质量, $GAP = (\text{上界} - \text{下界}) / \text{下界} \times 100\%$.

表 1 算例计算结果

Table 1 Computational results

规模	根节点		分支定界改进		改进量 (%)
	GAP	时间	GAP	时间	
10 × 10	3.39	0.14	2.73	158.42	0.66
10 × 15	2.99	0.27	2.22	270.92	0.77
10 × 20	3.04	0.57	2.03	525.2	1.01
15 × 10	4.87	0.17	4.24	250.85	0.63
15 × 15	4.85	0.40	3.89	449.76	0.96
15 × 20	4.97	0.89	3.32	768.96	1.65
20 × 10	6.3	0.23	5.38	235.62	0.92
20 × 15	6.21	0.51	5.27	584.28	0.94
20 × 20	5.91	1.20	4.64	1 052.43	1.27

计算结果说明:

1) 随着计划展望期越长, 根节点上启发式寻找可行解的效果越来越差. 这是因为在 4.6 节的启发式算法的补足计算中, 补足部分是尽量提前生产的, 所以规模生产的经济性可能降低, 同时偏离了热轧卷需求的适时性, 上界越来越差.

2) 计划展望期长度越长, 分支定界的改进效

果越好, 但产品组合数量增加, 最终解的质量呈下降趋势. 可能是由于在固定节点数量下分支搜索的范围较小的原因.

4.3 成本结构

对不同规模算例的运输与能量消耗(C1)、中间产品冷坯的库存成本(C2)、末端库成品库存成本(C3)、末端延期生产的损失(C4) 进行比较. 由于单位生产成本在短期计划中变化不大, 故而不参与计算. 令 $C = C1 + C2 + C3 + C4$, 各项物流与能耗成本平均比重(%) 见下表 2.

表 2 成本结构

Table 2 Cost structure

算例	C1/C	C2/C	C3/C	C4/C
10 × 10	67.08	4.99	12.92	15.01
10 × 15	67.87	2.96	13.99	15.18
10 × 20	68.87	2.23	15.25	13.65
15 × 10	64.08	6.76	13.14	16.02
15 × 15	64.10	3.97	15.57	16.36
15 × 20	64.74	3.47	17.05	14.74
20 × 10	59.74	9.10	13.75	17.41
20 × 15	60.60	6.46	15.26	17.68
20 × 20	61.44	5.35	15.06	18.15

可以看出:

1) 在相同的计划时间长度内, 产品组合数量增加, 结合表 1, 解的质量降低, 运输及能耗的成本比重降低, 冷坯库存成本比重增加, 同时, 观察到所有算例中, 解的质量越好, DHCR 和 HCR 的能力利用就越高, 由于板坯在 CCR 方式下进入如热轧需要更高的再加热能耗, 说明应提高热装比, 对降低两阶段连接的能耗、运输及中间产品的库存成本, 缩短产品生产时间的重要意义.

2) 在相同的产品组合下, 计划时间越长, 结合表 1, 冷坯库的库存成本比重越低, 尽管末端的库存成本和延期交货损失比重可能增加, 但解的质量越好. 说明在具有能力的限制下, 仍可能选择性地提前(或延迟) 生产, 以降低总成本. 计划期越长, 能够合理选择生产时间的空间就越大. 这方面需进一步研究.

上述分析说明了两阶段均衡生产的必要性, 但计划时间长度越长, 产品组合数量越多, 计算复杂性就越强, 计划制定越困难, 因此, 改进算法, 提

高解的质量是仍需进一步研究的问题。

5 结束语

本文对炼钢热轧的生产与物流进行一体化的建模和求解,结果表明算法能获得较满意的解,其重要意义在于对生产、交货、库存与运输方式的选择之间寻找均衡策略的一种尝试性探索研究。相对于目前各阶段单独决策的情况下,在控制合理的库存和减少积压、缩短产品的生产时间、降低非增值活动的资金占用、延期交货之间进行权衡,从而降低总成本和能源的消耗。

从决策支持系统的实施来看,在滚动计划中,应添加或修正具体约束,并为下一级的集成调度提供支持。

但是,炼钢热轧还有很多待研究的问题:如,考虑能力限制下不得不用高钢级产品满足客户低钢级需求的情况,这要求模型进行重大改进;目前板坯仍然是按下游客户化订单生产,但国外的研究表明这种方式与 MTS(make to stock) 结合可能降低生产与库存成本且具有更高的柔性^[28],这意味着应该发展新的决策方法来适应混合的制造模式;另外,运用对策论的思想设计两阶段的协调机制应该是值得深入研究的方向。

参 考 文 献:

- [1] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 133: 1 – 20.
- [2] Shapiro J F. Modeling the Supply Chain[M]. Duxbury: Thomson Learning, 2001.
- [3] Stadler H. Supply chain management and advanced planning: Basics, overview and challenges [J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 163: 575 – 588.
- [4] Erengü§ S, Simpson N C, Vakharia A J. Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review [J]. *European Journal of Operational Research*, 1999, 115: 219 – 236.
- [5] Maravelias C T, Sung C. Integration of production planning and scheduling: Overview, challenges and opportunities [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2009, 33(12): 1919 – 1930.
- [6] Hoesel S, Romeijn H E, Morales D R, et al. Integrated lot sizing in serial supply chains with production capacities [J]. *Management Science*, 2005, 51(11): 1706 – 1719.
- [7] 鲁其辉, 朱道立. 供应链中产品与信息质量改进的战略联盟策略研究 [J]. *管理科学学报*, 2010, 13(10): 79 – 88.
Lu Qihui, Zhu Daoli. Research on strategic alliances strategy of quality and information improvement in supply chains [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2010, 13(10): 79 – 88. (in Chinese)
- [8] Bredstrom D, Lundgren J T, Ronnqvist M, et al. Supply chain optimization in the pulp mill industry: IP models, column generation and novel constraint branches [J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 156: 2 – 22.
- [9] Ouhimmou M, S, Amours D, Beauregard R, et al. Furniture supply chain tactical planning optimization using a time decomposition approach [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 189: 952 – 970.
- [10] Tang L X, Liu J Y, Wang M G. A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production [J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 120: 423 – 435.
- [11] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex [J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 124: 267 – 282.
- [12] 朱宝琳, 于海斌, 黄小原, 等. 炼钢-热轧一体化计划问题研究 [J]. *信息与控制*, 2006, 35(4): 537 – 540.
Zhu Baolin, Yu Haibin, Huang Xiaoyuan, et al. Integrated planning for steelmaking-hot rolling [J]. *Information and Control*, 2006, 35(4): 537 – 540. (in Chinese)
- [13] 朱宝琳, 于海斌. 炼钢-连铸-热轧生产调度模型及算法研究 [J]. *计算机集成制造系统-CIMS*, 2003, 9(1): 33 – 36.
Zhu Baolin, Yu Haibin. Production scheduling model and algorithm for steelmaking-continuous casting-hot rolling processes [J]. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2003, 9(1): 33 – 36. (in Chinese)
- [14] 宋继伟, 唐加福. 基于离散粒子群优化的轧辊热处理调度方法 [J]. *管理科学学报*, 2010, 13(6): 44 – 53.
Song Jiwei, Tang Jiafu. Roller annealing scheduling method based on discrete particle swarm optimization [J]. *Journal of*

- Management Sciences in China ,2010 ,13(6) : 44 – 53. (in Chinese)
- [15]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[J]. 钢铁,2000 ,35(5) : 74 – 76.
Tang Lixin ,Yang Zihou ,Shen Hongyu ,et al. Analysis of modeling factor integrated lot planning for SM-CC-HRM[J]. Iron and Steel ,2000 ,35(5) : 74 – 76. (in Chinese)
- [16]Dantzig G B ,Wolfe P. Decomposition principle for linear programs[J]. Operations Research ,1960 ,8: 101 – 111.
- [17]Vanderbeck F ,Savelsbergh M W P. A generic view of Dantzig–Wolfe decomposition in mixed integer programming[J]. Operations Research Letters ,2006 ,34: 296 – 306.
- [18]Degraeve Z ,Jans R. A new Dantzig–Wolfe reformulation and branch-and-price algorithm for the capacitated lot-sizing problem with setup times[J]. Operations Research ,2007 ,55(5) : 909 – 920.
- [19]Pochet Y ,Wolsey A L. Lot-size models with backlogging: Strong reformulations and cutting planes[J]. Mathematical Programming ,1988 ,40: 317 – 335.
- [20]Zangwill W I. A deterministic multi-period production scheduling model with backlogging[J]. Management Science ,1966 ,13(1) : 105 – 119.
- [21]Zangwill W I. A backlogging model and a multi-echelon model of a dynamic economic lot size production system—a net work approach[J]. Management Science ,1969 ,15(9) : 506 – 527.
- [22]Lübbecke M E. Desrosiers J. Selected topics in column generation[J]. Operations Research ,2005 ,53(6) : 1007 – 1023.
- [23]Barnhart C ,Johnson E L ,Nemhauser G. L ,et al. Branch-and-price: Column generation for solving huge integer programs[J]. Operations Research ,1998 ,46(3) : 316 – 329.
- [24]Vanderbeck F. Column Generation[M]. New York: Springer ,2005.
- [25]Nemhauser G L ,Wolsey L A. Integer and Combination Optimization[M]. New York: John Wiley & Sons ,1988.
- [26]Wagner H M ,Whitin T M. Dynamic version of the economic lot size model[J]. Management Science ,1958 ,5(1) : 89 – 96.
- [27]Vanderbe F. On Dantzig–Wolfe decomposition in integer programming and ways to perform branching in a branch-and-price algorithm[J]. Operations Research ,2000 ,48(1) : 111 – 128.
- [28]Kerkkänen A. Determining semi-finished products to be stocked when changing the MTS-MTO policy: Case of a steel mill[J]. International Journal of Production Economics ,2007 ,108: 111 – 118.

Modeling and solution to integrated production and logistics planning of steel making and hot rolling

LUO Zhi-hong , TANG Li-xin

The Institute of Logistics , Northeastern University , Shenyang 110004 , China

Abstract: Reasonable inventories of steel slabs and hot-rolled coils , shortening production cycles , reducing energy consumption and improving customer's satisfaction by delivering goods on contracts are requirements in operations management in iron and steel industry. To reduce the production and logistics costs , considering different capacities and conflicting constraints , this paper present an integrated production and logistics planning model based on the characters of production and connection between steel making and hot rolling. We analyzed the extreme points of the uncapacitated hot rolling lot size polytope with backlogging and developed an equivalent mixed-integer programming formulation by applying combination of Dantzig–Wolfe decomposition and set partitioning to the original problem. The lower bound is obtained by column generation processing. Furthermore , we developed a heuristic algorithm to find initial solutions and improve them by branch and bound. Computational experiments presented randomly were tested and compared. The result shows that the satisfied solutions could be obtained by the proposed algorithm. Meanwhile , analysis of cost structures shows it is necessary to improve the hot slab charge rate and balance the production and logistics components.

Key words: integration; production and logistics; column generation