

编号: 1000-6788(2008)05-0077-08

## 钢铁原料物流计划问题的建模与求解

罗治洪<sup>1</sup>, 唐立新<sup>2</sup>, 张悟移<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 管理与经济学院, 昆明 650093 2. 东北大学 物流优化与控制研究所, 沈阳 110004)

**摘要:** 研究了钢铁工业从原料采购到初级产品生产的物流计划问题, 包括运输、库存和面向生产的配送。以所考虑的相关成本最小化为目标建立了数学规划模型, 并采用列生成的方法求解。对 0-1 变量的线性松弛采用启发式的分支和深度优先搜索策略尽可能快地获得好的可行解。在分支结点上, 通过求解最短路问题获得限制主问题所需要的列, 分支树上的根结点提供了体现可行解质量的下界。最后, 计算机随机试验验证了该模型的有效性和算法的稳定。

**关键词:** 物流管理; 生产计划; 分支定价; 列生成

中图分类号: F272.2

文献标志码: A

### Modeling and solving to raw materials logistics planning problem in iron and steel industry

LUO Zhi-hong<sup>1</sup>, TANG Li-xin<sup>2</sup>, ZHANG Wu-yi<sup>1</sup>

(1. School of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China 2. Institute of Logistics Optimization and Control, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** The planning problem of raw materials logistics in iron & steel industry, which includes transportation, inventory and distribution to production units, is researched in this paper. A mathematical programming model solved by column generation is formulated to minimize the associated total cost. To solve the linearly relaxation of 0-1 variables, heuristic branch rule and DFS (Depth-First-Search) are used to find a feasible and approximately optimal integer solution as quickly as possible. At the node of branching tree, the columns to the RMP (Restricted Master Problem) are obtained by solving shortest-path problems. The optimal solution at the root node, which is the lower bound, indicates the quality of the feasible solution. At last, the result of random experiment proves that the model is effective and the proposed algorithm is stable.

**Key words:** logistics management; production planning; branch & price; column generation

## 0 引言

2002年以来,进口矿石价格持续上涨,钢铁企业特别是以进口原料为主的企业的制造成本备受压力<sup>[1]</sup>。2005年初,中国从国际三大主要供应商进口铁矿石价格上涨71.5%。降低成本当务之急。从供应链物流一体化和协调的角度来看,跨组织和组织内部跨部门的物流协调和集成可以降低成本和提高竞争力。优化跨组织的物流协调活动的主要针对数量折扣、渠道协调、利润分配等方面<sup>[2~8]</sup>,试图使供应链上独立分散的企业决策尽量能够达到集中决策的效果。而跨部门集成包括供应、制造和销售一体化的优化与控制<sup>[9]</sup>。Stadtler和Kilger指出尽管供应链上的物流协调活动相当重要,但不能取代企业内部的物流一体化<sup>[10]</sup>。

钢铁原料种类多、采购周期变化大、生产工艺复杂、需要各个部门和链上不同企业之间的协调而引起人们的关注,最早可以追溯到Fabian提出的面向一体化的生产与库存管理<sup>[11]</sup>。文献[12]研究了进口铁矿石的订购、运输、库存的一体化物流系统,基于最小费用理论建立了数学规划模型,该研究成果能够为第三

收稿日期: 2007-01-04

作者简介: 罗治洪(1976-)男,四川攀枝花人,讲师,主要研究方向: 供应链与物流管理,生产运作管理,优化决策, E-mail: kmustlzh@163.com.

方物流公司提供有益参考. GAO 等研究了钢铁企业月计划层次的原料采购批量问题, 以采购成本和库存费用和最小为目标建立了混合整数规划模型, 采用列生成和广义上界方法求解<sup>[13]</sup>. 以上研究要么只是针对物流环节中的某一阶段进行优化, 要么只是单期的计划, 没有考虑多阶段多计划期下运作层次的物流优化决策.

本文研究了从原料采购到初级产品生产的物流计划问题, 建立了数学规划模型并采用 Branch & Price 的方法求解. 最后, 根据某钢铁公司的原料管理运作实践进行随机试验, 计算结果显示了较好的算法稳定性并得到了良好的近优解.

### 1 钢铁原料物流管理

钢铁原料一般由原燃料管理中心负责. 钢铁工业的原料流程见图 1, 主要物流活动包括:

- 1) 原料运输. 包括中转运输和直达运输, 中转原料一般指国外原料和国内长途运输原料, 这类原料通过谈判定价并确定下一年度采购量, 因此, 本文在短期计划内不考虑这些原料的采购成本. 而直达原料一般是距离较近、由供应商根据需要直接运入原料场的原料. 在不同时期, 中转原料的运输波动不能过大.
- 2) 库存管理. 主要包括对原料场、中间产品仓的管理和对中转仓的协调管理.
- 3) 生产配送管理. 原料准备作业, 即根据适合下游工艺的配料方案而准备一定时间段(以天为基数)使用的混合原料. 存在部分原料同时供烧结或炼铁使用, 但对粒度有要求, 需进行图 2 所示的加工处理. 在不同时间段内选择合理的配料方案是优化资源使用、降低成本的重要渠道. 但是, 对同一个生产设备, 配料方案不宜频繁变化, 这不符合稳产和高产要求, 过于频繁的变化, 将会引起产品合格率的波动、转换成本的上升.

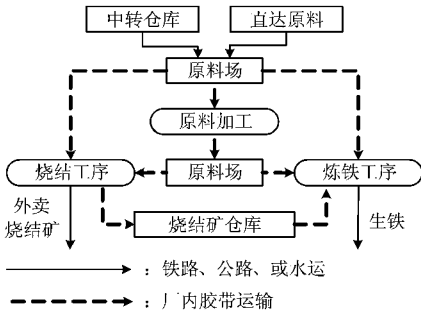


图 1 钢铁工业的原料物流

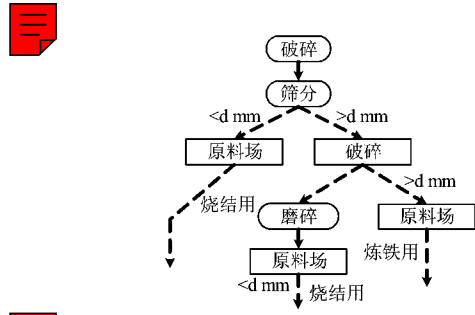


图 2 烧结和炼铁共用原料的加工过程

### 2 数学建模

基于上述原料集中管理的现状, 以最小化相关成本和为目标, 建立包括运输、库存和面向生产配送的物流优化模型 P. 本问题实质是一个多周期多阶段的原料或半成品向下一阶段分配的问题, 要确定多个计划期内, 不同阶段的库存和相邻阶段的物料流量. 模型中的符号见附录 A.

$$\begin{aligned}
 P: \quad & \min \left\{ \sum_{t \in T} \sum_{i \in I_1} c_i^{M-A} x_u^{M-A} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in I_2} c_i^M x_u^{M-A} + \sum_{t \in T} \sum_{i \in I_1} h_i^M v_i^M \right. \\
 & + \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} h_i^A v_i^A + \sum_{t \in T} \sum_{l \in I_{SB}} \sum_{n \in N} h_{in}^{AT} v_{int}^{AT} + c_{in}^{AT} x_{int}^{AT} + \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{r \in R_j^S} h_{jr}^S v_{jrt}^S \\
 & \left. + \sum_{t \in T} \sum_{i \in I_{SB}} \sum_{n \in N} c_{in}^{AT} x_{int}^{AT} + \sum_{j \in J} \sum_{p \in Q_j^S} c_{jp}^S z_{jp}^S + \sum_{k \in K} \sum_{q \in Q_k^B} c_{kq}^B z_{kq}^B \right\} \\
 \text{s.t.} \quad & f_{it}^u (1 - e_i) \leq x_{it}^{M-A} \leq f_{it}^u (1 + e_i), \quad i \in I_1, t \in T \quad (1) \\
 & \sum_{i \in I_1} f_{it}^u (1 + e_i) \leq C^{M-A}, \quad t \in T \quad (2) \\
 & \sum_{i \in I} x_{it}^{M-A} \leq C^{A-in}, \quad t \in T \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$l_{i,t-1}^M + p_{it}^M - x_{it}^{M-A} = l_{it}^M, \quad i \in I1, t \in T \tag{4}$$

$$l_{i,t-1}^A + x_{it}^{M-A} - \sum_{n \in N} x_{int}^{AT} = l_{it}^A, \quad i \in ISB, t \in T \tag{5}$$

$$\sum_{i \in I} l_{it}^A + \sum_{i \in ISB} \sum_{n \in N} l_{int}^{AT} \leq C^A, \quad t \in T \tag{6}$$

$$l_{it}^A + \sum_{j \in J} \sum_{p \in Q_r^S} \sum_{r \in R_j^S} w_{jpr}^{A-S} q_{jpr}^S \delta_{jprt}^S z_{jp}^S - l_{i,t-1}^A - x_{it}^{M-A} = 0, \quad i \in IS, t \in T \tag{7}$$

$$l_{it}^A + \sum_{k \in K} \sum_{q \in Q_s^B} \sum_{s \in R_k^B} w_{iks}^{A-B} d_{ik}^B \delta_{kqst}^B z_{kq}^B - l_{i,t-1}^A - x_{it}^{M-A} = 0, \quad i \in IB, t \in T \tag{8}$$

$$l_{inu}^{AT} + \sum_{j \in J} \sum_{p \in Q_r^S} \sum_{r \in R_j^S} w_{injpr}^{A-S} q_{jpr}^S \delta_{jprt}^S z_{jp}^S - l_{i,t-1}^{AT} - x_{inu}^{AT} = 0, \quad n \in N \setminus \{3\}, i \in ISB, t \in T \tag{9}$$

$$l_{inu}^{AT} + \sum_{j \in J} \sum_{p \in Q_r^S} \sum_{r \in R_j^S} w_{injs}^{A-B} d_{ik}^B \delta_{kqst}^B z_{kq}^B - l_{i,t-1}^{AT} - x_{inu}^{AT} = 0, \quad n \in \{3\}, i \in ISB, t \in T \tag{10}$$

$$l_{jrt}^S + \sum_{p \in Q_j^S} q_{jpr}^S \delta_{jprt}^S z_{jp}^S - l_{jrt}^S - \sum_{k \in K} \sum_{q \in Q_s^B} \sum_{s \in R_k^B} w_{jprks}^{S-B} d_{ik}^B \delta_{kqst}^B z_{kq}^B = d_{jrt}^S, \quad r \in R_j^S, j \in J, t \in T \tag{11}$$

$$\sum_{q \in Q_j^S} z_{jq}^S = 1, \quad j \in J \tag{12}$$

$$\sum_{q \in Q_k^B} z_{kq}^B = 1, \quad k \in K \tag{13}$$

$$x_{it}^{M-A}, x_{int}^{AT}, l_{it}^M, l_{it}^A, l_{jrt}^S, l_{inu}^{AT} \geq 0$$

$$\delta_{jprt}^S, \delta_{kqst}^B, z_{jp}^S, z_{kq}^B \in \{0, 1\}$$

目标函数包括：库存成本、运输成本、直达原料的采购成本、共用原料的加工成本，设备在计划期内的生产费用(  $c_{jp}^S, c_{kq}^B$  )，后者包括产品的生产成本和由于生产配料方案的改变引起的转换成本。约束(1)~(2)为中转原料运输的波动性要求，受运输条件的影响，约束(3)为原料场每个计划期的输入限制，由原料场的物料卸载设备能力决定，约束(4)为中转仓库的库存平衡，约束(5)为共用原料加工平衡，约束(6)为原料场的容量限制，由原料场堆放能力决定，如堆场的数量、形状大小与堆料的高度限制等，约束(7)~(11)反映原料、共用原料加工产品、烧结矿的库存平衡。凸约束(12)和(13)表示每个设备在计划期内只能采用一个配料作业计划。

### 3 模型求解

约束(7)~(11)反映了两个阶段的物料需求联系，为耦合约束。(12)和(13)为凸约束。这说明模型约束具有角形结构，采用分解与协调的算法是合适的，把整个问题根据设备分解成不同 pricing 子问题，主问题向子问题提供协调因子(对偶变量)，子问题提供主问题需要的列(代表计划期内可行配料作业计划)，不断迭代直至所有子问题不能对目标值有贡献为止，这就是列生成的原理，其优点是可行解质量较高<sup>[14~18]</sup>。启发式分支和深度优先搜索策略主要用来保证尽快获得优良可行解。整个求解思路为 Branch & Price。

#### 3.1 限制主问题 RMP

问题  $P$  为主问题。对于一个设备，计划期长度为 30，可用配料方案有 4 种，则所有可行配料作业计划几乎不可枚举，要从中根据整个问题的最优性选择其一一是困难的。令  $\tilde{Q}_j^S \subseteq Q_j^S$  为设备  $j$  的已知可行配料作业计划集， $\tilde{Q}_k^B \subseteq Q_k^B$  为设备  $k$  的已知可行配料作业计划集。把  $P$  中的  $Q_j^S, Q_k^B$  分别换成  $\tilde{Q}_j^S, \tilde{Q}_k^B$ ， $P$  就称为 RMP(Restricted Master Problem)。

RMP 中 0-1 变量线性松弛后，令约束(7)~(8)所对应的对偶变量为  $\alpha_{it}$ ，(9)~(10)对应的对偶变量为  $\beta_{inu}$ ，(11)对应的对偶变量为  $\gamma_{jrt}$ ，(12)和(13)对应的对偶变量分别为  $\eta_j, \mu_k$ 。令对偶最优解表示为  $\bar{\alpha}_{it}, \bar{\beta}_{inu}, \bar{\gamma}_{jrt}, \bar{\eta}_j, \bar{\mu}_k$ 。给定一个烧结设备  $j$  的配料作业计划  $p$ ，其削减费用(Reduced Cost)可以表示为(炼铁设备  $k$  可

类似表示):

$$rc_{jp}^S = c_{jp}^S - \sum_{t \in T} \sum_{r \in R_j^S} \sum_{i \in IS} w_{ijr}^{A-S} q_{jr}^S \delta_{jprt}^S \bar{\alpha}_{it} - \sum_{t \in T} \sum_{r \in R_j^S} \sum_{i \in ISBn \in N \setminus \{j\}} w_{inj}^{A-S} q_{jr}^S \delta_{jprt}^S \bar{\beta}_{int} - \sum_{t \in T} \sum_{r \in R_j^S} q_{jr}^S \delta_{jprt}^S \bar{\gamma}_{jrt} - \bar{\eta}_j \tag{14}$$

列生成的每一步迭代需要检查的是 在  $\forall j \in J, \forall k \in K$  中,子问题是否还存在削减费用为负的列,如果有则采取后面叙述的选择策略加入到 RMP 中,迭代过程一直持续到找不到有负削减费用的列为止.

### 3.2 子问题

每个设备的子问题构造成一个最短路问题,约束主要是配料方案连续使用的长度限制及分支树上表达分支规则的约束.图 3 为设备  $j$  子问题的网络有向图,有向图上的一条路径就代表一个可行的配料作业计划,假定  $|T| = 7, |R_j^S| = 3, L_{jr}^{S-\min} = 2$ ,则图中的粗黑线为一条路径.子问题符号说明见附录 B.

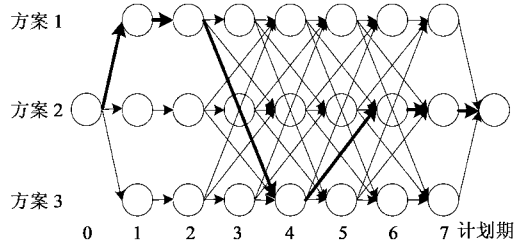


图 3 子问题的网络表示

网络图上连接  $r, t$  和  $\bar{r}, t+k$  的有向弧表示在计划期  $t$  未生产配料方案由  $r$  转为了  $\bar{r}$ ,且一直持续到计划期  $t+k$  末.由(14)可以把图上连接  $r, t-L_{jr}^S$  和  $\bar{r}, t$  的弧上的削减费用表示为:

$$rc_{jrt}^{S-arc} = c_{jrt}^{change\_over-S} + \sum_{\tau=t-L_{jr}^S+1}^t c_{jr}^{production-S} q_{jr}^S - \sum_{\tau=t-L_{jr}^S+1}^t \sum_{i \in IS} w_{ijr}^{A-S} q_{jr}^S \bar{\alpha}_{it} - \sum_{\tau=t-L_{jr}^S+1}^t q_{jr}^S \bar{\gamma}_{jr\tau} - \sum_{\tau=t-L_{jr}^S}^t \sum_{i \in ISBn \in N \setminus \{j\}} w_{inj}^{A-S} q_{jr}^S \bar{\beta}_{int} \tag{15}$$

因此,设备  $j$  子问题 SUB\_  $S_j$  可表示为:

$$\begin{aligned} \min & \sum_{t \in T} \sum_{r \in R_j^S} \sum_{\bar{r} \in R_j^S} rc_{jrt}^{S-arc} a_{jrt}^S \\ \text{s.t.} & \sum_{\bar{r} \in R_j^S: L_{jr}^S \leq t} a_{jrt}^S - \sum_{r \in R_j^S: t+L_{jr}^S \leq |T|} a_{jrt}^S = \begin{cases} -1 & t=0, r=r_{j0} \\ 1 & t=|T|+1, r \in R_j^S, t \in T \cup \{0, |T|+1\} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{16} \\ & a_{jrt}^S \in \{0, 1\}, r, \bar{r} \in R_j^S, t \in T \end{aligned}$$

最短路求解方法<sup>[19]</sup>不再赘述.最短路  $p(r_1, r_2, \dots, r_t, \dots, r_{|T|})$ 可以表示为一个按计划期顺序排列的配料方案队列,如果  $p$  被选入 RMP,则 RMP 所需要的列是很容易求出来的.如果  $r = r_t, \delta_{jprt}^S = 1$ ,否则  $\delta_{jprt}^S = 0$ .同时, RMP 中该列的目标函数系数可表示为(17).

$$c_{jp}^S = \sum_{t=1}^{|T|} \{c_{jr_t}^{production-S} q_{jr_t}^S + c_{jr_{t-1}r_t}^{change\_over-S}\} \tag{17}$$

### 3.3 求解需要解决的问题

RMP 线性松弛后的解往往不能满足整数性要求,分支是一种常用且自然的选择,但算法能够有效实现,必须考虑:

#### 1) 如何获得初始列

列生成过程,要有一定的初始可行列,通过求解子问题,使 RMP 的规模不断增大,才能不断改进线性松弛的解.初始可行列的获得,影响到该结点处线性松弛求解的快慢<sup>[14,15]</sup>.常用初始列的产生方法有启发式和人工变量法.本文采用人工变量的方法,相关约束加一个人工变量.如表示烧结矿库存平衡的约束,加入人工变量后变为:

$$l_{jr, t-1}^S + \sum_{p \in \bar{Q}_j^S} q_{jr}^S \delta_{jprt}^S z_{jp}^S - \sum_{k \in K} \sum_{q \in \bar{Q}_s^B} \sum_{s \in R_k^B} w_{jrs}^{S-B} d_{kqst}^B z_{kq}^B - l_{jr}^S + g_{jrt}^S = d_{jrt}^S \tag{18}$$

### 2) 列的选择策略

Vanderbeck 认为列的选择首先要有助于 RMP 的线性松弛问题的求解,其次是有助于构造整数解<sup>[14]</sup>. 经验表明,如果子问题能够有效地求得最优解,那么,把最负削减费用的列加入 RMP 中效果较好,如果子问题采用近优算法,则加入多个具有负削减费用的列效果更好<sup>[15]</sup>. 本文子问题是最短路问题,能够有效求出最优解,因此选择加入最负削减费用的列.

### 3) 分支策略

如果 RMP 的线性松弛的解是分数解,采用如下启发式分支方法:

Step1 求出以下值:

$$hp = \min \left\{ \max_{j, r, t} \sum_{p \in \tilde{Q}_j^S} \delta_{jprt}^S z_{jp}^S, \max_{k, s, t} \sum_{q \in \tilde{Q}_k^B} \delta_{kqst}^B z_{kq}^B \right\} \quad (19)$$

$$mp = \min \left\{ \min_{j, r, t} \left| \sum_{p \in \tilde{Q}_j^S} \delta_{jprt}^S z_{jp}^S - 0.5 \right|, \min_{k, s, t} \left| \sum_{q \in \tilde{Q}_k^B} \delta_{kqst}^B z_{kq}^B - 0.5 \right| \right\} \quad (20)$$

$$lp = \min \left\{ \min_{j, r, t} \sum_{p \in \tilde{Q}_j^S} \delta_{jprt}^S z_{jp}^S, \min_{k, s, t} \sum_{q \in \tilde{Q}_k^B} \delta_{kqst}^B z_{kq}^B \right\} \quad (21)$$

Step2 分支的规则按如下步骤:

- ① 如果  $hp \geq p^{ub}$ ,  $p^{ub}$  为一个接近 1 且小于 1 的小数,则分左支:  $\delta_{j\hat{r}\hat{t}}^S = 1$  (或  $\delta_{k\hat{q}\hat{t}}^B = 1$ ),不分右支. 其中  $\hat{j}$ ,  $\hat{r}$ ,  $\hat{t}$  由(20)求出;
- ② 如果①不能满足,则考虑:如果  $lp \leq p^{lb}$ ,  $p^{lb}$  为一个接近 0 且大于 0 的小数,则只分右支:  $\delta_{j\hat{r}\hat{t}}^S = \alpha$  (或  $\delta_{k\hat{q}\hat{t}}^B = 0$ ),不分左支;
- ③ 如果②不能满足,则寻找最模棱两可的情况,  $mp$  表示了这种可能性,对其进行完整的分支. 左支:  $\delta_{j\hat{r}\hat{t}}^S = 1$  (或  $\delta_{k\hat{q}\hat{t}}^B = 1$ ),右支:  $\delta_{j\hat{r}\hat{t}}^S = \alpha$  (或  $\delta_{k\hat{q}\hat{t}}^B = 0$ ).

对于分支约束  $\delta_{j\hat{r}\hat{t}}^S = 1$ ,在子问题 SUB\_  $S_j$  中,表示计划期  $\hat{t}$  一定要采用配料方案  $\hat{r}$ ,要把有向图中所有与点  $r, \hat{t}, r, \hat{t} + 1, \dots, r, \hat{t} + L_{jr}^{S-\min} - 1$  ( $r \neq \hat{r}$ )相关联的弧删除.

### 3.4 算法流程

Branch & Price 算法流程见图 4. 内层循环为列生成过程,外层是为了尽快获得较好质量的可行解而采用的启发式分支和深度优先搜索.

## 4 随机试验

### 4.1 算例的产生

某钢铁公司是我国大型钢铁企业.该公司每月下旬接受订单,根据需求确定下一个月生铁和烧结矿的生产计划,然后再确定各类原料的入厂计划.共使用 17 种主要原料,其中,10 种原料从中转仓库入厂,7 种原料从供应商直接入厂;有 10 种原料供烧结使用,1 种原料供炼铁使用,6 种原料供烧结和炼铁共同使用(另外还有一些下游工艺产生的废料如氧化铁皮等也供烧结使用,但用量很少,所以不予考虑).有一个共用的大型原料场,中转原料的运输波动控制在  $-10\% \sim +10\%$ ,即  $e_i = 10\%$ . 外卖烧结矿占整个产量的比重很小而忽略,即  $d_{jrt}^S = 0$ . 考虑到短期内设备数量并不会发生变化,因此两个阶段的烧结机和高炉的个数不变,均为 3 台.但本模型仍然能够适应不同阶段拥有不同设备数量的情况.在算例产生中,模型的参数除了以下均由该公司的实

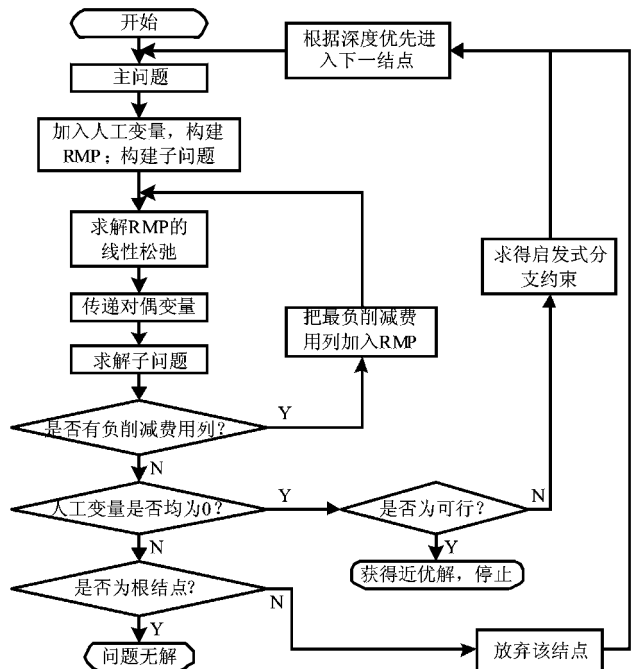


图 4 Branch & Price 算法流程图

际数据.模型的参数除了以下均由该公司的实

际数据而来：

1) 中转原料到达量采用 EOQ 方法计算得到, 到达中转仓库时间转换为计划期内的随机整数. 同时, 各种原料的初始库存均按照 EOQ 匀速消耗来确定；

2)  $p^{ub} = 0.9$ ,  $p^{lb} = 0.001$ ；

3) 每种配料方案的最小连续使用时间长度为  $L_{jr}^{S-\min} = 2$ ；

4) 为适应采购渠道扩大的趋势, 根据配料实践随机产生配料方案, 如某种原料  $i$  的单位消耗为  $[0.4, 0.5]$ , 则产生的配料方案  $r$  中的单位消耗  $w_{ijr}^{A-S} = U[0.4, 0.5]$ ；

5) 成本数据因为获取困难, 采用平均分布随机生成.

根据以上数据的产生方法, 按以下两个条件产生随机算例, 一共有 9 种不同规模的算例, 每种产生 20 个, 共有 180 个随机算例.

1) 计划期长度  $|T|$  分别为 30、40 和 50；

2) 在实际配料方案的基础上产生的每个设备的可用配料集大小  $|R_j^S| = |R_k^B| = 4, 7$  和 10.

#### 4.2 计算结果

算法程序中使用了嵌入式优化工具 OSI (Optimal Standard Library), 在 VC++6.0 平台上该模块能够实现线性规划、一般整数规划的分支定界等基本问题的求解. 同时, 另外一个重要功能是能够在求解线性规划的同时获得对偶变量的值. 本文中的算例在 P4 2.4G、物理内存 512M PC 上运行. 由于算法并不求解最优, 故采用了对偶间隙 (ZUB-ZLB)/ZUB 来度量可行解的质量. 其中 ZUB 是可行解的目标值, ZLB 为根结点上主问题线性松弛的最优解作为下界. 算法的平均对偶间隙和平均运行时间见表 1.

表 1 算法性能测试结果

序号	问题规模 $ R  \times  T $	对偶间隙 (%)			运行时间 (s)		
		最差	最好	平均	最差	最好	平均
1	4 × 30	0.77	0.10	0.37	257.45	65.70	103.41
2	7 × 30	2.46	0.17	0.52	252.56	58.00	130.20
3	10 × 30	0.59	0.08	0.33	395.45	71.14	174.07
4	4 × 40	1.62	0.02	0.25	297.70	132.27	210.28
5	7 × 40	0.78	0.15	0.43	516.33	217.17	377.12
6	10 × 40	2.16	0.16	0.53	1093.38	289.16	585.87
7	4 × 50	1.15	0.04	0.25	727.45	253.97	409.08
8	7 × 50	0.61	0.06	0.39	795.45	202.19	425.81
9	10 × 50	1.75	0.21	0.44	3885.63	645.91	1434.33

随机试验结论：

1) 以上随机试验结果可以看出, 平均对偶间隙均在 1% 以下, 反映了可行解的质量.

2) 计划期长度和配料方案个数增加, 运行时间相应增加, 不难理解, 最短路子问题中的弧增加, 同时, 约束个数和决策变量都要相应增加, 与运行时间增加是一致的.

## 5 结束语

本文直接把原料物流计划问题描述为一个集划分问题 (Set Parting Problem), 而通常整数规划问题可通过 Dantzig-Wolf 分解转化为集划分问题. 集划分问题可用 Branch & Price 方法求解, 启发式的分支策略能够得到高质量的解. 本文随机试验结果中 1% 以下的平均对偶间隙显示了解的质量.

钢铁企业原料物流的集成计划问题, 能对运作层次的跨部门物流集成决策支持系统的建立和解决局部与整体利益的矛盾提供有益的参考. 在原料采购价格上升, 成本备受压力的环境下, 优化原料使用和降低成本是本文的目的, 同时也能够提高决策的精度. 本文模型经过修改, 可以适应不同钢铁企业的原料物

## 流计划决策.

## 参考文献:

- [ 1 ] 杨艳玲,张远利.钢铁企业降低物流成本方法探讨[J].物流技术,2004,7:57-58.  
Yang Y L, Zhang Y L. Discussion on reducing on logistics cost in iron and steel business[J]. Logistics Technology, 2004, 7: 57-58.
- [ 2 ] Fangruo C, Federgruen A, Zhen Y -S. Coordination mechanism for a distribution system with one supplier and multiple retailers [ J ]. Management Science, 2001, 4( 5 ) 693 - 708.
- [ 3 ] Kirstin K. Supply chain coordination with uncertain just-in-time delivery[ J ]. Internal Journal of Production Economics, 2002, 77 ( 1 ): 1 - 15.
- [ 4 ] Willem K K, Teunter R H. Effects of coherent supply chain and demand rate variability on EOQ[ J ]. Internal Journal of Production Economics, 1998, 54( 2 ): 173 - 192.
- [ 5 ] Lee H L, Rosenblatt M J. A generalized quantity discount pricing model to increase supplier profits[ J ]. Management Science, 1986, 32( 9 ): 1177 - 1185.
- [ 6 ] Banerjee A. A joint economic lot size model purchaser and vendor[ J ]. Decision Science, 1986, 17 : 292 - 311.
- [ 7 ] Kim B. Coordinating an innovation in supply chain management[ J ]. European Journal of Operational Research, 2000, 123 : 568 - 584.
- [ 8 ] 常良风,卢震,黄小原.供应链渠道协调中的 Stackelberg 主从对策[J].控制与决策,2003,18(6):651-656.  
Chang L F, Lu Z, Huang X Y. Stackelberg game in supply chain channel coordination[ J ]. Control and Decision, 2003, 18( 6 ): 651 - 656.
- [ 9 ] Zhao W, Zheng S Y. Optimal dynamic pricing for perishable assets with non-homogeneous demand[ J ]. Management Science, 2000, 46( 3 ): 375 - 388.
- [ 10 ] Stadler H, Kilger C. Supply Chain Management and Advanced Planning[ M ]. Berlin : Springer-Verlag Press, 2002, 8 - 10.
- [ 11 ] Fabian T. A linear programming model of integrated iron and steel production[ J ]. Management Science, 1958, 4( 4 ): 415 - 449.
- [ 12 ] 吕靖,陈超,沙继东.基于最小费用理论的进口铁矿石物流系统研究[J].大连海事大学学报,2004,30(1):41-44.  
Lu J, Chen C, Sha J D. Analysis of iron ore import logistic system on the basis of the minimum cost theory[ J ]. Journal of Dalian Maritime University, 2004, 30( 3 ) 41 - 44.
- [ 13 ] Gao Z, Tang L X. Combine column generation with GUB to solve the steel-iron raw materials purchasing lot-sizing problem[ J ]. Acta Automatic Sinica, 2004, 30( 1 ): 20 - 25.
- [ 14 ] Vanderbeck 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.
- [ 15 ] Lübbecke M E, Desrosiers J. Selected topics in column generation[ J ]. Operations Research, 2005, 53( 6 ): 1007 - 1023.
- [ 16 ] Chen Z L, Powell W B. A column generation based decomposition algorithm for a parallel machine just-in-time scheduling problem [ J ]. European Journal of Operational Research, 1999, 116 : 220 - 232.
- [ 17 ] 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 - 332.
- [ 18 ] Bredström D, Lundgren J T, Rönaqvist 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.
- [ 19 ] 谢政,李建平.网络算法与复杂性理论[ M ].长沙:国防科技大学出版社,1995,98-137.  
Xie Z, Li J P. Network Algorithm and Complexity Theory[ M ]. Changsha : Press of National University of Defense Technology, 1995, 98 - 137.

## 附录 A 模型 P 中的符号说明

## 1) 集合:

- $I$ : 原料集, 下标  $i$  ;  
 $I1$ : 中转原料集 ;  
 $I2$ : 直达原料集 ;  
 $IS$ : 烧结用原料集 ;  
 $IB$ : 炼铁用原料集 ;  
 $ISB$ : 烧结和炼铁共用原料集 ;  
 $N$ : 共用原料被加工的产品集,  $N = \{1, 2, 3\}$ , 下标  $n$  ;  
 $J$ : 烧结设备集, 下标  $j$  ;  
 $K$ : 炼铁设备集, 下标  $k$  ;  
 $T$ : 计划的时间段集, 下标  $t$  ;  
 $R_j^S$ : 烧结设备  $j$  的配料方案集, 下标  $r$  ;  
 $R_k^B$ : 炼铁设备  $k$  的配料方案集, 下标  $s$  ;  
 $Q_j^S$ : 烧结设备  $j$  的生产计划集, 下标  $p$  ;  
 $Q_k^B$ : 炼铁设备  $k$  的生产计划集, 下标  $q$  .

## 2) 模型参数:

- $p_i^M$ : 计划期  $t$  原料  $i$  到达中转仓库的量 ;  
 $d_{jr}^S$ : 计划期  $t$  设备  $j$  按照配料方案  $r$  生产的烧结矿的外需求量 ;  
 $d_{ka}^B$ : 计划期  $t$  设备  $k$  生产的生铁的需求量 ;  
 $q_{jr}^S$ : 烧结设备  $j$  单个周期采用配料方案  $r$  的生产量 ;  
 $C^{A-in}$ : 原料场的入料能力 ;  
 $C_t^{M-A}$ : 计划期  $t$  从中转仓库运输原料的能力 ;  
 $C^A$ : 原料场的库存能力 ;  
 $e_i$ : 原料  $i$  的最大运输波动 ;  
 $c_i^{M-A}$ : 原料  $i$  的单位运费 ;  
 $c_i^M$ : 直达原料  $i$  的采购费用 ;  
 $c_{in}^{AT}$ : 由原料  $i$  加工成  $n$  的加工费用 ;  
 $w_{ijr}^{A-S}$ : 设备  $j$  按照方案  $r$  生产单位烧结矿所需的原料  $i$  的使用量 ;  
 $w_{inj}^{A-S}$ : 设备  $j$  按照方案  $r$  生产单位烧结矿所需的由原料  $i$  加工的  $n$  的使用量 ;  
 $w_{iks}^{A-B}$ : 设备  $k$  按照方案  $s$  生产单位生铁所需的原料  $i$  的使用量 ;  
 $w_{jks}^{S-B}$ : 设备  $k$  按照方案  $s$  生产单位生铁所需的由设备  $j$  按照方案  $r$  生产的烧结矿的使用量 ;  
 $w_{inks}^{A-B}$ : 设备  $k$  按照方案  $s$  生产单位生铁所需的由原料  $i$  加工的  $n$  的使用量 ;  
 $h_i^M$ : 中转仓库里原料  $i$  的库存成本 ;  
 $h_i^A$ : 原料  $i$  在原料场的库存成本 ;  
 $h_{in}^{AT}$ : 由原料  $i$  加工的  $n$  在原料场的库存成本,  $i \in ISB, n \in N$  ;  
 $c_{in}^{AT}$ : 由原料  $i$  加工成  $n$  的加工成本 ;  
 $h_{jr}^S$ : 由设备  $j$  按照方案  $r$  生产的烧结矿的库存成本 ;  
 $c_{jp}^S$ : 设备  $j$  执行生产计划  $p$  对应的成本 ;  
 $c_{kq}^B$ : 设备  $k$  执行生产计划  $q$  对应的成本 .