

基于混匀配矿的露天矿山供应链建模与求解

刘文博^{1,2}, 许 特¹, 孙德峰¹

(1. 东北大学 工业与系统工程研究所, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁省交通高等专科学校, 辽宁 沈阳 110122)

摘要: 从供应链角度出发, 分析原矿配矿的生产特点, 考虑生产任务和生产能力限制、库存平衡约束、资源消耗量限制以及质量指标等要求, 以生产、运输、库存总成本最小、所获得净利润最大及质量品位偏差最小为目标建立了 0-1 混合整数规划数学模型. 采用拉格朗日松弛(LR)算法对该模型进行求解. 仿真实验结果表明, 中规模算例 LR 算法可以在较短时间内获得可行解, 大规模算例可以在 CPLEX 软件求不到解的情况下运用 LR 算法在可接受时间内得到可行解. 最后对出矿点品位参数进行了灵敏度分析, 品位的扰动对质量偏差以及总目标函数值有较大的敏感性.

关键词: 配矿; 供应链; 0-1 混合整数规划; 拉格朗日松弛算法(LR); 灵敏度分析

中图分类号: F224

文献标志码: A

Modeling and Solution of Open Pit Supply Chain Considering Ore Blending

LIU Wenbo^{1,2}, XU Te¹, SUN Defeng¹

(1. Institute of Industrial and Systems Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Provincial College of Communications, Shenyang 110122, China)

Abstract: From the perspective of supply chain, this paper takes into consideration the production characteristics in ore blending process, and establishes a 0-1 mixed-integer program which aims at maximizing the profit and minimizing the deviation of product's ore grade, and satisfies the constraints of production capacity, resource limits, inventory balancing and product quality requirements. The Lagrangian relaxation algorithm (LR) is adopted to solve the problem. Computational experiments show that LR could fast obtain the feasible solution for medium-scale instances, and could obtain the optimal solutions within reasonable time for large-scale instances while CPLEX fails to obtain the feasible solutions. Besides, the sensitivity analysis on the grade parameters is conducted, and the results show that disturbance of the grade is a sensitive factor for the quality deviation and the general

objective function value.

Key words: ore blending; supply chain; 0-1 mixed integer program; Lagrangian relaxation algorithm (LR); sensitivity analysis

在市场经济条件下, 矿山企业生存与发展的关键在于如何用较低的成本获得质量好的产品, 从而赢得用户和占领市场. 我国虽然是一个矿产资源大国, 但却是一个资源相对贫乏的国家, 与世界资源大国相比, 我国中小型矿偏多, 大型矿床偏少, 贫矿多, 富矿少, 从矿产资源的空间分布来看, 我国矿产分布很不均匀, 埋藏深的多, 可露天开采的少. 任何一个矿山在全矿床的范围内矿石的质量分布总是不均匀的. 以辽宁鞍钢集团矿业公司为例, 其矿体特点是薄、细、小, 并且采矿点多, 出矿部位多, 各部位矿石性质有差异, 从而影响选矿指标的稳定性. 为了保证选矿厂正常生产, 获得良好的技术经济指标, 要求入选矿石的质量指标必须均衡稳定. 因此, 一般情况下, 需要将矿石进行配矿与混匀.

配矿是矿山适应市场经济需要而规划、管理矿石质量的技术方法. 不同地区的矿石品位和质量因其成矿年代、成矿地质构造的不同而不同, 即使是同一地区的矿石也会因矿层的不同、开采方式的不同而出现差异, 所以开采出来的矿石品位等质量指标波动是很正常的^[1]. 于是, 在采矿和运装过程中, 矿山企业根据现有资源和生产能力, 按照相关的质量指标, 有计划有目的地按比例搭配不同品位的矿石, 使之混合均匀, 以保证生产的矿石达到需求部门要求的质量标准(如原矿品位、储量等). 同时有计划地搭配部分贫矿石, 使之达到工业经济利用标准, 有助于矿产资源的合理利用, 改善采矿场的采矿时空关系, 避免压盘现象, 为维持矿山正常生产创造有利条

收稿日期: 2016-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(71321001)

第一作者: 刘文博(1980-), 女, 副教授, 博士生, 主要研究方向为生产计划与调度, 物流优化与控制. E-mail: 12465793@qq.com

件. 而一旦提高了部分贫矿石的质量等级, 也就相应提高了其价格标准, 这样既提高了矿石质量的均匀性和稳定性, 做到了合理均衡供矿, 又有助于增加矿山经济收入, 获得较好的经济效益^[2].

国内外专家学者对配矿问题的研究做了一些工作, 取得了不少成果. 辛格^[3]是用线性规划模型求出产品的最优配矿方案, 并使挖掘和运输费用最少. 巩凡亮等^[4]在满足原矿生产任务和生产能力以及相关出矿要求和限制约束条件下, 以最高综合出矿品位为目标建立了线性规划模型. 王连印等^[5]建立了矿石混配问题的线性规划模型和矿石品位控制问题的优化控制模型, 使得矿石品位满足生产要求. 在配矿优化的数学建模中多以品位波动值最小为目标. 井石滚等^[6]建立的多出矿点多受矿点数学模型, 是在满足生产能力和生产任务的约束下以与要求品位偏差最小为目标函数的. 李志国等^[7]是以入选原矿品位指标及低品位矿石利用量为主要目标, 同时考虑资源能力约束, 构建了多目标优化配矿模型. 侯煜^[8]建立了配矿问题的线性规划模型, 是以配矿品位波动最小为目标, 满足生产能力和生产任务以及矿石质量等约束. 陈鹏能等^[9]构建的线性规划模型是以追求矿山经济效益最大化为目标, 并考虑矿石品位与有害杂质的含量等约束.

国内外学者对供应链计划建模优化问题也有一些研究. Nishi 等^[10]提出了一种分布式供应链计划优化模型, 并提出用增广拉格朗日松弛算法对其进行求解, 该方法可应用在复杂的石油工业供应链规划问题以及多个企业的中期规划问题上. Steinrücke^[11]研究了铝业供应链网络上生产-运输的计划与调度方法. 考虑供应链上带有提前奖励的生产与运输总成本最小化的基于连续时间的混合整数模型, 该模型能协调供应链上成员间的数量与时间, 最后采用一种启发式的变量松弛算法来求解. Chen 等^[12]建立了供应链上的最优生产计划模型, 供应链包括原材料采购、半成品采购与生产、产能分配以及成品生产和分销, 该集成计划的建模技术和应用能显著提高经济效益.

与以往文献构建配矿优化问题的模型不同, 受到供应链计划建模的启发, 本文从供应链角度对涉及配矿的各环节进行整体分析和研究, 提出了一个基于混匀配矿的露天矿山供应链模型的框架结构, 建立了一个 0-1 混合整数线性规划模型, 并采用拉格朗日松弛算法进行求解.

1 问题描述

提高供给用户的产品质量是采选作业的主要任务之一. 选矿前对原矿进行混匀配矿是公认的改善矿物原料质量的方法. 它可以稳定生产工艺, 减少设备停产时间, 降低产品成本, 提高劳动生产率, 并实现矿产资源的综合利用, 从而提高经济效益. 因此, 原矿的混匀配矿作业对选厂生产优化具有重要意义.

矿石混匀配矿是在采矿、装载、运输、堆存和卸矿过程中, 通过堆积和混合作用进行的. 在矿山工作面、露天矿料场、破碎-筛分车间、烧结车间、团矿车间的矿仓内进行的全部混矿过程, 可以总称为矿石混匀系统. 各混匀系统有共同特征, 但由于矿物类型、采矿和加工方法不同, 也各有其特点^[13]. 以鞍钢集团矿业公司的混匀配矿工艺流程为例, 根据出矿量、矿石性质、可选性试验结果、选矿工艺条件制定配矿计划, 各出矿点按计划组织出矿, 以汽运方式到采场倒装场进行第一次混矿, 然后以铁路运输或者皮带运输方式运到粗破碎车间后进入中破碎中级矿仓进行第二次混矿, 接着到细破矿仓、筛分矿仓、球磨矿仓都会进行混矿, 最后到达球磨作业前, 矿石已相对混合比较均匀. 矿山混匀配矿是一个系统工程, 涉及众多部门, 需要高度协调才能达到降低成本、合理配矿、提高矿石产品质量的目的. 目前配矿优化问题的模型大多局限在单一阶段, 即多出矿点-单(多)受矿点配矿线性或非线性模型. 从供应链角度出发, 出矿点可以看作供应商, 终极混矿的最终产品可以看作销售商, 而中间的各阶段混矿过程可以整体看作制造商. 由于混矿方法多种多样, 为了不失一般性, 本文把中间混矿内部的转化过程忽略, 只考虑紧邻上游和下游的环节, 如图 1 所示.

本文所构建的模型既要满足出矿点的质量要求同时也要满足终极混矿产品的质量要求, 出矿点(供应商)、中间混矿(制造商)、终极混矿(销售商)之间量的协调方面利用库存平衡约束来体现, 由于每启动一个出矿点都要耗费一定的人力、物力、设备等相关的资源, 所以模型中设定了一个最高资源消耗量; 同理, 生产终极混矿产品也有相应的资源消耗, 在模型中也为之设定了一个上限. 综合考虑了以上因素, 并以成本最小、净利润最大、质量指标偏差最小为驱动, 合理开发利用整个矿山混匀系统.

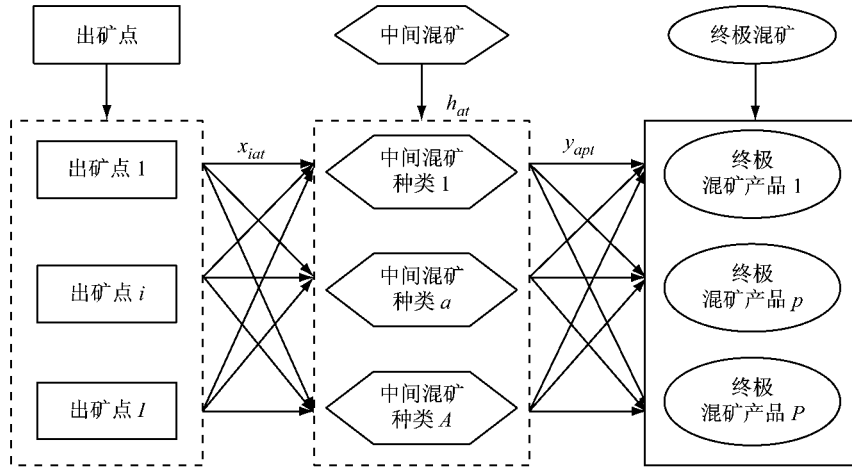


图 1 基于混匀配矿的露天矿山供应链框架

Fig.1 The framework of open pit supply chain considering ore blending

2 数学模型

以下建立基于混匀配矿的露天矿山供应链问题的 0-1 混合整数线性规划模型。

$$\begin{aligned} \min f = & \sum_{i,a,t} C_{ia}^1 x_{iat} + \sum_{a,t} C_{at}^2 h_{at} + \sum_{a,p,t} C_{ap}^3 y_{apt} + \\ & \sum_{i,t} S_{it}^1 w_{it} + \sum_{p,t} S_{pt}^2 z_{pt} - \sum_{a,p,t} v_{pt} y_{apt} + \\ & \theta \sum_{i,a,t} F_{ia} x_{iat} \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中的参数表示如下: C_{ia}^1 为从出矿点 i 开采出来的矿石运到生成中间混矿产品种类 a 处的单位运输成本; C_{at}^2 为在时间 t 中间混矿产品种类 a 的单位库存成本; C_{ap}^3 为生成终极混矿产品 p 所需中间混矿产品种类 a 的单位生产成本; S_{it}^1 为在时间 t 启动出矿点 i 的启动成本; S_{pt}^2 为在时间 t 生产终极混矿产品 p 的启动成本; v_{pt} 为在时间 t 终极混矿产品 p 所能获得的净利润; F_{ia} 为入选出矿点 i 与所对应的中间混矿产品种类 a 的目标质量指标值的偏差, 即 $F_{ia} = |g_{ia} - g_a|$; θ 为目标函数中第 7 项的系数, 即所有出矿点的质量指标值与所对应的中间混矿产品的质量指标值偏差目标的系数(考虑不同数量级对目标函数值的影响, 故设此系数来进行调整)。

式(1)中的变量表示如下: x_{iat} 为在时间 t 从出矿点 i 到中间混矿矿仓生成中间混矿产品种类 a 的出矿量; h_{at} 为在时间 t 中间混矿产品种类 a 的库存量; y_{apt} 为在时间 t 生成终极混矿产品 p 所需要中间混矿产品种类 a 的配矿量;

$$w_{it} = \begin{cases} 1 & \text{在时间 } t \text{ 出矿点 } i \text{ 被启用} \\ 0 & \text{其他} \end{cases};$$

$$z_{pt} = \begin{cases} 1 & \text{在时间 } t \text{ 生产终极混矿产品 } p \\ 0 & \text{其他} \end{cases}.$$

s. t. $Q_{it}^{\min} \leq r_i w_{it} \leq Q_{it}^{\max} \quad \forall i \in I, t \in T$ (2)

式中: r_i 为启动出矿点 i 所需要的资源消耗量; Q_{it}^{\min} , Q_{it}^{\max} 分别表示在时间 t 出矿点 i 开采的资源消耗量的最小值和最大值限制; I 为所有采矿点集合; T 为时间周期集合。

$$H_{\min}^a \leq h_{at} \leq H_{\max}^a \quad \forall a \in A, t \in T \quad (3)$$

式中: H_{\max}^a , H_{\min}^a 分别表示在时间 t 中间混矿产品种类 a 的库存量上限、下限值; A 为中间混矿阶段产生的中间产品种类集合。

$$\sum_{a \in A} h_{at} \leq H \quad \forall t \in T \quad (4)$$

式中: H 为中间混矿矿仓的最大库存能力。

$$\sum_{i \in I} x_{iat} + h_{a,(t-1)} - \sum_{p \in P} y_{apt} = h_{at} \quad \forall a \in A, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{a \in A} y_{apt} \leq M_p z_{pt} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (6)$$

式中: M_p 为每个时间周期内终极混矿产品 p 的出厂量限制; P 为终极混矿阶段产品种类集合。

$$\sum_{p \in P} z_{pt} \leq K \quad \forall t \in T \quad (7)$$

式中: K 为终极混矿产品种类的限制。

$$\begin{aligned} \sum_{a \in A} (g_{ia} - g_a^{\max}) x_{iat} & \leq 0 \\ \sum_{a \in A} (g_{ia} - g_a^{\min}) x_{iat} & \geq 0 \\ \forall i \in I, t \in T \end{aligned} \quad (8)$$

式中: g_{ia} 为入选出矿点 i 所对应生成的中间混矿产品种类 a 的质量指标值; g_a^{\max} , g_a^{\min} 分别为生成中间

混矿产品种类 a 对所入选出矿点的最高和最低质量指标值。

$$\sum_{a \in A} L_{p,t} y_{apt} \leq \sum_{a \in A} g_a y_{apt} \leq \sum_{a \in A} U_{p,t} y_{apt} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (9)$$

式中: g_a 为中间混矿产品种类 a 的目标质量指标值; $L_{p,t}$, $U_{p,t}$ 分别为时间终极混矿产品 p 的质量指标下限和上限。

$$\sum_{i \in I} r_i w_{it} \leq R \quad \forall t \in T \quad (10)$$

式中: R 为在某时间周期内启动所有出矿点的资源消耗量上限。

$$\sum_{p \in P} b_p z_{pt} \leq B \quad \forall t \in T \quad (11)$$

式中: b_p 为启动终极混矿产品 p 所需要的资源消耗量; B 为生产所有终极混矿产品所耗费资源量的上限。

$$\sum_{a \in A} y_{apt} \geq d_{pt} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (12)$$

式中: d_{pt} 为在时间 t 终极混矿产品 p 的需求量。

$$x_{ia,t} \geq 0 \quad \forall i \in I, a \in A, t \in T \quad (13)$$

$$y_{apt} \geq 0 \quad \forall a \in A, p \in P, t \in T \quad (14)$$

$$h_{at} \geq 0 \quad \forall a \in A, t \in T \quad (15)$$

$$w_{it}, z_{pt} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, p \in P, t \in T \quad (16)$$

模型中, 目标函数(1)共有 7 项: 第 1 项是指从出矿点运到各中间混矿矿仓总的运输成本; 第 2 项是指在中间混矿矿仓内所有中间混矿产品的库存成本; 第 3 项是指生成终极混矿总的生产成本; 第 4 项是指所有出矿点的启动成本; 第 5 项是指生产终极混矿产品总的启动成本; 第 6 项是指所有终极混矿产品所获得的净利润值; 第 7 项是指出矿点的质量指标值与所对应的中间混矿产品的质量指标值的偏差。由于是最小化问题, 第 6 项前面加上了负号。

约束(2)是从开采的具体流程和工艺角度出发, 确保在一个时段内, 出矿点开采所需的资源消耗量要控制在一个最大值和最小值之间; 约束(3)表示中间混矿产品库存量的上、下限限制; 约束(4)表示对于某个时间周期内中间混矿矿仓的最大库存容量限制; 约束(5)表示在中间混矿矿仓的库存平衡约束; 约束(6)表示在每个时间周期对某终极混矿产品的总产量的限制; 约束(7)表示在每个时间周期所有终极混矿产品种类的限制; 约束(8)表示对出矿点原矿的质量指标要求; 约束(9)表示对终极混矿产品的质量指标要求; 约束(10)表示在某时间周期内对启动的出矿点所耗费的资源消耗总量的限制; 约束(11)表示在某时间周期内对启动的终极混矿产品所耗费的

的资源消耗总量的限制; 约束(12)表示要满足终极混矿产品的需求量; 约束(13)~(16)是变量的取值范围。

3 拉格朗日松弛算法求解

3.1 拉格朗日松弛算法

拉格朗日松弛算法是一种已经获得广泛应用的优化算法, 其基本原理是, 利用拉格朗日乘子松弛掉原问题中难以处理的约束, 从而将问题变为较易解决的拉格朗日松弛子问题, 并通过求解拉格朗日对偶问题而逐步逼近获取原问题的最优解。本文将该原理用于模型求解中, 根据大量的实验表明, 约束(10)的增加与否, 对求解时间甚至是否能得到解起着决定性的作用, 于是根据求解规模不同, 采取松弛约束(10)的策略, 具体操作如下所述。

引入拉格朗日乘子 $\lambda_t > 0$, 松弛约束(10)后得到以下的松弛问题(LR):

$$L = \min \left(\sum_{i,a,t} C_{ia}^1 x_{ia,t} + \sum_{a,t} C_{at}^2 h_{at} + \sum_{a,p,t} C_{ap}^3 y_{apt} + \sum_{i,t} S_{it}^1 \tau w_{it} + \sum_{p,t} S_{pt}^2 z_{pt} - \sum_{a,p,t} \nu_{pt} y_{apt} + \theta \sum_{i,a,t} F_{ia} x_{ia,t} + \sum_{t \in T} \lambda_t \left(\sum_{i \in I} r_i w_{it} - R \right) \right) \quad (17)$$

满足约束(2)~(9), (11)~(16)。

进一步, 得到相应的拉格朗日对偶问题(LD)如下:

$$L' = \max_{\{\lambda_t\}} \{ \min L \} \quad (18)$$

给定一组乘子 $\{\lambda_t\}$, 问题(LR)可分解成每个对应出矿点的若干独立的子问题。将对应的出矿点 i 的子问题表示为 L_i , 描述为

$$L_i = \min \left(\sum_{i,a,t} C_{ia}^1 x_{ia,t} + \sum_{a,t} C_{at}^2 h_{at} + \sum_{a,p,t} C_{ap}^3 y_{apt} + \sum_{p,t} S_{pt}^2 z_{pt} - \sum_{a,p,t} \nu_{pt} y_{apt} + \theta \sum_{a,t} F_{ia} x_{ia,t} + \sum_t (S_{it}^1 + \lambda_t r_i) \tau w_{it} \right) \quad (19)$$

满足约束(2)~(9), (11)~(16)。因此, 对于每个出矿点在满足库存平衡以及质量指标要求等限制条件下, 最优求解式(17)。从而, L 也可表示为

$$L = -R \sum_t \lambda_t + \sum_i L_i \quad (20)$$

利用拉格朗日松弛算法求解本文的基于混匀配矿的露天矿山供应链模型主要包括 3 个方面: 求解子问题、更新拉格朗日乘子和构造可行解。松弛后的对偶函数的目标值是原问题的下界, 由于松弛问题的解对原问题来说是不可行的, 通过启发式算法可

以把不可行解变成可行解,可行解的目标值为原问题提供了一个上界,解的质量通过相对的对偶间隙来衡量.本文的子问题求解和可行解求解均由CPLEX软件求得,乘子更新采用的是次梯度算法^[14]求解.

该算法的整体步骤表述如下:

步骤1 拉格朗日松弛算法的初始化.令 $m=0, u=0, l=-\infty, \lambda^{(0)}=0$, 其中 m 为迭代次数标号, $\lambda^{(m)}$ 为在第 m 代中的拉格朗日乘子, l 是当前问题的最大下界.

步骤2 求解子问题.给定拉格朗日乘子,所有的子问题采用CPLEX软件求解,可以得到问题LD的最优解和相应的目标函数值 $g_{\text{LR}}^{(m)}$. 如果 $g_{\text{LR}}^{(m)} > l$, 用 $g_{\text{LR}}^{(m)}$ 更新 l .

步骤3 可行解的构造.基于LD的解,通过3.3中的启发式算法构造原问题的可行解,将构造出的可行解记为 $X^{(m)}$, 对应的目标函数值记为 $g_{\text{L}}^{(m)}$. 如果 $g_{\text{L}}^{(m)} < u$, 用 $g_{\text{L}}^{(m)}$ 更新 u , 用 $X^{(m)}$ 更新 X^* , 其中 X^* 是原问题的当前最好解.

步骤4 如果满足下面的停止准则之一,算法停止.

(1) 对偶间隙 $g_{\text{op}} = |(u-l)/l| < \epsilon$, 其中 ϵ 是一个较小的正数.

(2) m 大于预先给定的迭代次数上限.

步骤5 按照3.2中的描述更新拉格朗日乘子,令 $m=m+1$, 转到步骤2.

3.2 拉格朗日乘子更新

本文是利用次梯度算法来求解与式(18)相关的对偶问题的.求解对偶问题(18)的次梯度算法步骤如下表述:

步骤1 初始化.令迭代次数 $m=1$, 乘子 $\{\lambda_i\}$ 初始化为0.

步骤2 求解子问题并计算对偶函数值和次梯度.利用CPLEX软件求解所有子问题,根据式(18)计算对偶函数值,并计算次梯度为

$$g_1(\lambda^{(m)}) = \sum_i r_i w_{it} - R \quad (21)$$

式中: $\lambda^{(m)}$ 是第 m 次迭代中由 $\{\lambda_i\}$ 组成的乘子向量.

步骤3 更新乘子.根据下式计算下次迭代要使用的乘子

$$\lambda^{(m+1)} = \lambda^{(m)} + s_1^{(m)} g_1(\lambda^{(m)}) \quad (22)$$

第 m 代步长 $s_1^{(m)}$ 计算如下:

$$s_1^{(m)} = \omega \frac{L^U - L^{(m)}}{\|g_1(\lambda^{(m)})\|^2}, 0 < \omega < 2 \quad (23)$$

式中: L^U 为最优目标函数值,即等于历史上得到的

最好可行目标值; $L^{(m)}$ 是第 m 次迭代的对偶函数目标值;参数 ω 的初始值设为0.5.

步骤4 检查停止条件.若达到最大迭代次数或对偶间隙小于1%,程序停止;否则,令 $m = m + 1$, 返回步骤2.

3.3 启发式算法构造上界

拉格朗日松弛子问题求得的结果对原问题来说通常是不可行的,需要设计一些有效方法来找到问题的可行解.

通过实验算例发现,松弛后的子问题得到的解通常是不满足约束(10)的,即由于启动出矿点需要消耗的资源量是有限的,所以在某个时间周期有些出矿点不易启动.其基本思路是,将多开启的出矿点关闭后,在满足了所有时间周期内启动的出矿点消耗的资源消耗总量的限制条件下,再满足其他约束使目标函数值达到最优.

问题重点是如何将子问题求得的解进行修正,以满足约束(10).其中涉及到变量 w_{it} 的确定.基于现实考虑,出矿点应选取出矿量大且资源消耗量小的为宜.如第 n 代记参数 $E_{it}^{(n)}$, 其中子问题求得的出矿量是 $x_{it}^{(n)}$, 令 $E_{it}^{(n)} = \sum_{a \in A} x_{it}^{(n)} / r_i$.

构造可行解的操作步骤如下:

步骤1 对于时间 t , 设有一个出矿点集合 K_t , 检查由拉格朗日松弛算法得到的解,若不满足 $\sum_{i \in K_t} r_i w_{it} \leq R$, 转步骤2, 否则, 转到步骤3.

步骤2 根据 $E_{it}^{(n)}$ 的值由高到低进行排序,按新的排序将各出矿点编入集合 O_t 中, 此集合中出矿点编号分别为 $i_1, i_2, \dots, i_k, \dots, i_{O_t}$, 令 $L_t = \sum_{k \in O_t} r_{i_k}$,

$k' \in O_t$, 若 $\sum_{k=1}^{k'-1} r_{i_k} \leq R$ 且 $\sum_{k=1}^{k'} r_{i_k} > R$, 根据满足资源消耗量最大值的约束, k' 可以作为一个分割点, 可知集合 O_t 中根据编号出矿点 k' 及以后的各出矿点均不开采, 即 $w_{i_{k'}t} = 0, w_{i_{k'+1}t} = 0, \dots, w_{i_{O_t}t} = 0$. 转到步骤3.

步骤3 将确定后的 w_{it} 做为常量, 利用CPLEX软件求出其他变量, 并最终获得可行解.

4 结果与分析

4.1 试验结果分析

试验所使用的数据是根据现场观察及整理, 并按照实际的物理意义通过随机数模拟仿真所得. 本文算法是在 Windows 7 环境下利用 Visual Studio

2010 编写,在 CPU 主频 2.83 GHz,物理内存 3.25 GB 的计算机进行测试.对各算例的子问题是用 CPLEX 软件进行求解.对于小规模算例,可以用 CPLEX 软件直接求解;对于大规模算例 CPLEX 无法直接求到原问题的最优解,采用拉格朗日松弛算法进行求解.算法运行的停止条件设定为对偶间隙 1.00% 以内或迭代次数达到 500 代,由此来测算 CPU 运行时间.本模型间隙值用拉格朗日松弛算法与 CPLEX 算法时间差的绝对值与 CPLEX 算法时间的比值表示.参数 θ 的取值根据不同算例取值不同,小规模算例即算例 1~3, θ 取值为 0.3,中规模的算例即算例 4~6, θ 取值为 0.2,大规模的算例即算例 7~10, θ 取值为 0.1,该参数的取值主要是能体现出该项目的实际含义.不同规模算例的计算结果如表 1 所示.

表 1 基于混匀配矿的露天矿山供应链模型的求解时间
Tab.1 Solution time for open pit supply chain model considering ore blending

算例 编号	I-T-A-P	求解时间/s		间隙/%
		CPLEX 算法	拉格朗日松 弛算法	
1	3-4-3-4	0.08		
2	10-6-4-5	0.16		
3	20-6-10-15	1.06		
4	30-10-30-25	151.43	121.25	0.326 3
5	30-10-50-50	169.74	148.64	0.458 4
6	40-10-50-50	187.94	170.27	0.784 2
7	50-10-100-100	>24 h	285.46	
8	80-10-100-120	>24 h	318.92	
9	80-12-100-100	>24 h	353.18	
10	50-15-100-100	>24 h	418.43	

由表 1 可知:

(1) 小规模算例(算例 1~3),利用 CPLEX 软件可以直接求解,大规模的算例(算例 7~10) CPLEX 无法在有效时间内求解.

(2) 对于中规模算例(算例 4~6),利用拉格朗日松弛算法求解所花费的时间要比直接用 CPLEX 软件的时间平均减少 13.92%,利用拉格朗日松弛算法与 CPLEX 软件求得的结果对偶间隙都在 1.00% 以内,算例 4 只迭代了 168 次,算例 5 迭代了 201 次,算例 6 迭代了 229 次.

(3) 对于大规模算例,利用拉格朗日松弛算法可以在可接受时间内得到可行解(算例 7~10 的对偶间隙都在 1.00% 以内),算例 7~10 的迭代次数分别用了 245,271,348,413 次.

4.2 灵敏度分析

合理的混匀配矿方案是用较低的成本提高混匀

产品的质量.衡量该产品质量的标准体现在 5 个方面,分别为混匀产品的品位高,粒度均匀,混匀后的产品中杂物含量少,化学成分稳定,且有优化的配矿方案,平衡好各种有害杂质元素,即“高、匀、净、稳、优”.提高混匀产品的品位并使其化学成分稳定是混匀过程中追求的主要质量目标.所建模型中各出矿点的品位作为已知量参与到矿山供应链协调决策中.由于地质条件的差异,各出矿点的品位有一定的不确定性,于是本文将各出矿的品位作为灵敏度分析参数,分析该参数的变化对各目标结果的影响,从而为获得有效且稳定的品位设置提供重要理论依据.

灵敏度分析^[15]可以用来评价参数的不确定性对结果运行的影响,有助于模型参数校正.在最优化方法中经常利用灵敏度分析来研究原始数据不准确或发生变化时最优解的稳定性.通过灵敏度分析还可以判断哪些参数对模型有较大的影响.因此,灵敏度分析是寻优和方案评价过程中最常用的分析手段.

对具有代表性的算例 5 的出矿点品位参数进行灵敏度分析.分析时,各矿点品位取其原设计参数值的 $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$, $\pm 20\%$ 作为出矿点品位的扰动值,求得的各项目标函数的值见表 2.通过设定几组不同品位参数,根据 7 项目标值以及总目标值,绘制了运输成本、出矿点品位与中间混矿产品品位的质量指标偏差值以及整个目标函数值的灵敏度曲线,见图 2~4.

从灵敏度计算结果和灵敏度曲线可以得出以下结论:

(1) 各出矿点的品位对质量指标偏差值最为敏感,对整个目标函数值也比较敏感.通过曲线走势可以看出,品位增加时,偏差目标和总目标先增加然后减少,这与实际相符,因为刚开始开采品位高的矿石可以增加利润,但是再继续开采高品位的矿石对整个矿山开采周期是不利的,需要考虑与贫矿的合理搭配,同时对尾矿也要进行科学合理的开发.出矿点品位的设置非常重要,关系到最终混匀产品的质量和稳定性要求,所以必须充分且精确地做好矿山存量探查和品位预测工作.

(2) 各出矿点的品位对运输成本的扰动也较敏感,对出矿量的影响趋势是逐渐减少最后保持稳定的,这是由于为满足目标品位的要求,出矿点品位低时出矿量会很多,但是随着出矿点品位不断提高,出矿量会逐渐减少,但到后期考虑与贫矿搭配开采,出

表 2 出矿点品位扰动的灵敏度分析结果

Tab.2 Results of sensitivity analysis on disturbance of mines grade

千元·t⁻¹

品位扰动/ %	运输成本	库存成本	生产成本	出矿点的 启动成本	生产终极混矿产品 的启动成本	净利润值	出矿点与中间混矿 产品质量偏差	总目标函数值
-20	589.01	155	960	60	715	-6 260	1 110.8	-2 750.2
-15	552.86	155	960	60	715	-6 260	1 212.3	-2 684.8
-10	537.65	155	960	60	715	-6 260	1 191.8	-2 720.5
-5	526.93	155	954	60	715	-6 150	1 077.4	-2 772.0
0	518.81	155	960	60	715	-6 260	1 031.4	-2 819.8
5	518.81	155	960	60	715	-6 260	1 005.9	-2 845.2
10	518.81	155	960	60	715	-6 260	980.4	-2 870.7
15	518.87	155	960	60	715	-6 260	954.9	-2 896.2
20	518.92	155	960	60	715	-6 260	929.3	-2 921.8

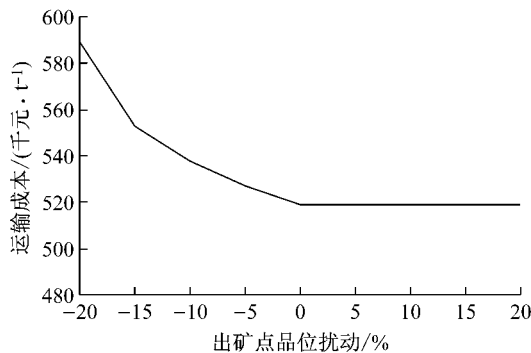


图 2 出矿点品位扰动对运输成本的灵敏度

Fig.2 Sensitivity of transportation cost on disturbance of mines grade

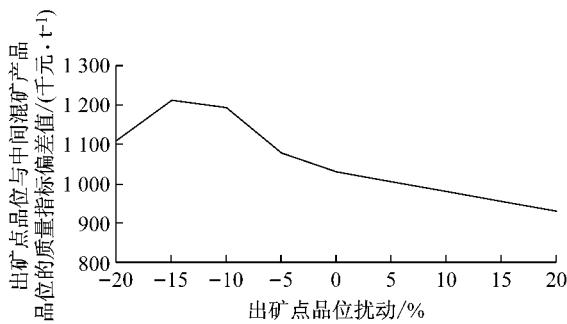


图 3 出矿点品位扰动对质量偏差目标的灵敏度

Fig.3 Sensitivity of target quality deviation on disturbance of mines grade

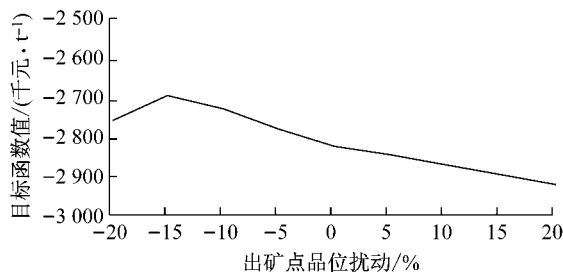


图 4 出矿点品位扰动对目标函数值的灵敏度

Fig.4 Sensitivity of objective function value on disturbance of mines grade

矿量会相对稳定在一个合理范围之内。

(3) 各出矿点的品位对库存成本、出矿点的启动成本以及最终混矿产品的敏感度低,这是因为它们主要受固定成本、变动成本以及价格等其他参数的影响,但由于本文着重考虑质量指标的相关参数,所以省略了其他参数的灵敏度分析。

5 结论

(1) 以混匀配矿为背景,并站在供应链的角度对涉及配矿的各环节进行整体分析与描述,构建了一个基于混匀配矿的露天矿山供应链问题的 0-1 混合整数线性规划模型。

(2) 所建模型整体考虑了出矿、运输、库存、配矿等各阶段供求双方在量和质量指标上的协调与平衡,目标中既考虑了经济因素,包括生产、库存及运输成本,也包括利润等经济效益,同时将质量指标也作为考量标准,使得该数学模型有较好的现实意义。

(3) 对基于矿山真实数据而随机产生的算例进行了计算.结果表明,对于中规模的算例,拉格朗日松弛算法优于 CPLEX 软件求解,并在 CPLEX 软件无法求解大规模算例的情形下拉格朗日松弛算法也能在可接受的时间内获得可行解。

(4) 基于混匀配矿产品质量指标的重要性,对各出矿点品位参数进行了灵敏度分析.结果表明,出矿点品位对总目标函数、质量偏差等都有较强的敏感性,并且随着品位增加目标值总体趋势是下降的,说明一味开采高品位的矿石不利于整个生命周期矿山供应链的发展,开采过程中需要与低品位矿石搭配,以可持续发展的战略眼光合理科学开采,同时需要供应链上的各部门高度协调、整体配合,才能使矿山企业获利。

参考文献:

- [1] 赖阳,张楚灵,姜建明. 运用配矿技术控制矿石质量[J]. 采矿技术,2002,2(1):5.
LAI Yang, ZHANG Chuling, JIANG Jianming. Get use of ore blending technology to control ore quality [J]. Mining Technology,2002,2(1):5.
- [2] 易丽平,王李管,房智恒. 线性规划在露天配矿中的应用[J]. 现代矿业,2010,1(1):42.
YI Liping, WANG Liguang, FANG Zhiheng. The application of linear programming in the open mine blending [J]. Modern Mining,2010,1(1):42.
- [3] 辛格 A K,张可能. 使用线性规划方法编制露天铁矿的生产计划[J]. 矿业工程,1988(8):76.
SINGH A K, ZHANG Keneng. Determine the production plans for open pit utilizing linear programming [J]. Mining Engineering,1988(8):76.
- [4] 巩凡亮,胡双喜. 线性规划在计划配矿中的应用[J]. 矿业快报,2006,5(5):58.
GONG Fanliang, HU Shuangxi. The application of linear programming in ore blending planning [J]. Express Information of Mining Industry,2006,5(5):58.
- [5] 王连印,骆中洲. 矿石品位控制的原理与方法[J]. 金属矿山,1992(2):20.
WANG Lianyin, LUO Zhongzhou. The principle and method of ore grade control[J]. Metal Mine,1992(2):20.
- [6] 井石滚,卢才武,顾清华. 基于 GIS 的露天矿生产配矿数字化管理系统[C]//国际遥感大会. 杭州:[s. n.],2010:426-429.
JING Shigun, LU Caiwu, GU Qinghua. Digital management system of ore blending in an open pit based on GIS[C]//2010 International Conference on Remote Sensing (ICRS). Hangzhou:[s. n.],2010:426-429.
- [7] 李志国,崔周全,张电吉,等. 磷矿堆场多目标优化配矿模型[J]. 武汉工程大学学报,2012,34(10):11.
LI Zhiguo, CUI Zhouquan, ZHANG Dianji, *et al.* Iron concentration and sulfur reduction on sulphuric acid drag by magnetic roasting-magnetic separation [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2012,34(10):11.
- [8] 侯煜. 线性规划法在露天矿配矿领域的应用[J]. 矿业工程,2006,4(1):22.
HOU Yu. The principle and method for the ore blending in open pit[J]. Mining Engineering,2006,4(1):22.
- [9] 陈鹏能,张电吉,李志国,等. 昆阳磷矿数字配矿优化模型与配矿工艺规程[J]. 武汉工程大学学报,2012,34(10):37.
CHEN Pengneng, ZHANG Dianji, LI Zhiguo, *et al.* Digital optimization model & technical procedure of ore blending of Kun Yang phosphate[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2012,34(10):37.
- [10] NISHI T, SHINOZAKI R, KONISHI M. An augmented lagrangian approach for distributed supply chain planning for multiple companies [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering,2008,5(2):259.
- [11] STEINRÜCKE M. An approach to integrate production-transportation planning and scheduling in an aluminium supply chain network [J]. International Journal of Production Research,2011,49(21):6559.
- [12] CHEN M, WANG W. A linear programming model for integrated steel production and distribution planning [J]. International Journal of Operations & Production Management,1997,17(6):592.
- [13] SERKO E E. 矿石混匀和破碎现状,完善及提高矿石混匀和破碎效率的主要途径[J]. 国外金属矿选矿,1984(12):12.
SERKO E E. Improve the state of ore blending and crushing, a key routine for improving the efficiency of ore blending and crushing[J]. Metallic Ore Dressing Abroad,1984(12):12.
- [14] FISHER M. The lagrangian relaxation method for solving integer programming problems [J]. Management Science,1981,27(1):1.
- [15] 信昆仑,詹书俊,陶涛,等. 基于灵敏度分析的供水管网模型多目标校核[J]. 同济大学学报(自然科学版),2014,42(5):736.
XIN Kunlun, ZHAN Shujun, TAO Tao, *et al.* Multi-objective calibration of hydraulic model in water distribution network based on sensitivity analysis[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2014,42(5):736.