

## 粒子群优化算法在大型选矿企业 原料采购计划中的应用

黄肖玲<sup>1</sup> 柴天佑<sup>2</sup>

**摘要** 选矿厂的原矿采购成本是构成精矿成本的主要部分. 优化原矿采购计划就是寻求最小采购成本. 在保证选矿生产工艺确定的精矿品位和原矿处理量的条件下, 使原矿采购成本最小的各种原矿采购计划对降低选矿企业的生产成本至关重要. 本文提出了在保证生产精矿需求和精矿品位的条件下, 使精矿库存尽量最小的原矿需求模型和使采购成本最小的各种原矿采购模型. 采用基于模糊规则调整惯性权值的粒子群优化算法, 对上述模型进行了动态优化求解, 确定了各种原矿的采购量. 采用了某选矿厂的实际数据进行了仿真实验, 实验结果表明了本文所提方法的有效性.

**关键词** 原矿采购计划, 精矿品位, 精矿库存, 粒子群优化, 模糊规则  
**中图分类号** TP278; TP301.6

### Particle Swarm Optimization for Raw Material Purchasing Plan in Large Scale Ore Dressing Plant

HUANG Xiao-Ling<sup>1</sup> CHAI Tian-You<sup>2</sup>

**Abstract** The raw ores purchasing cost is the main part of concentrate cost in an ore dressing plant. To optimize the raw ores purchasing plan is to minimize the purchasing cost. While assuring conditions of concentrate grade and quantity of raw ores which are required by production technology, the purchasing plan for varieties of raw ores to minimize the purchasing cost is very crucial to minimize the production cost of an ore dressing plant. Meeting the needs of concentrate inventory and concentrate grade, two models are proposed in this paper: the raw ores demand model for minimizing concentrate inventory and the raw ores purchasing model for minimizing purchasing cost. A particle swarm optimization (PSO) algorithm, based on fuzzy rule to adjust inertia weight, is used to dynamically optimize the models and to make sure the purchasing quantity of varieties of raw ores. Simulation experiments have been conducted by using the real data of an ore dressing plant. The result shows the effectiveness of the proposed algorithm in this paper.

**Key words** Raw ores purchasing plan, concentrate grade, concentrate inventory, particle swarm optimization (PSO), fuzzy rule

对具有连续生产特点的选矿企业来说, 由于其生产规模大, 对原矿的需求量也大, 为了保证连续生产, 需要一定的原

料储备来保证生产有效顺利进行, 这就需要占用流动资金. 选矿企业的原矿采购占用的流动资金一般多达 80% 以上. 此外, 品位高的原矿采购价格高, 品位低的原矿虽然采购成本低, 但需要进行生产处理的成本上升. 因此, 原矿采购计划要求保证精矿品位和原矿处理量的同时, 使采购成本最小. 采购计划要受到库存, 包括原料库存 (原矿堆) 和产品 (精矿) 库存、设备的生产能力等限制.

文献 [1-2] 研究的是与选矿相关的调度问题; 文献 [3] 从供应链观点出发, 考虑铁前原料物流过程建立钢铁企业原料采购计划模型, 但模型没有考虑库存约束对原料采购的影响; 文献 [4] 针对库存约束和原料成本建立原料采购计划模型, 但没有考虑生产过程需求对原料采购的影响; 文献 [5] 考虑定价和生产能力建立原料采购计划模型, 但没有考虑库存约束对原料采购的影响. 上述方法都没有研究选矿企业原料采购计划.

本文结合原矿采购与选矿过程的特点, 建立了面向选矿过程的各种原矿需求的采购模型. 提出保证生产精矿需求和精矿品位, 满足精矿库存、设备能力等约束下, 使原矿采购成本最小的各种原矿采购量的优化算法.

### 1 原矿采购与选矿过程的描述

选矿过程主要由原料、竖炉、磨矿、磁选、浓缩五个工序组成. 其生产工艺流程如图 1 (见下页) 所示<sup>[6]</sup>.

来自原矿堆场的  $N$  种原矿量即为  $y_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , 经过原矿处理过程, 筛分出粉矿和块矿. 粉矿直接输送到磨矿工序, 磨成粒度合格的矿浆, 再经磁选工序的强磁选设备进行磁选, 处理成精矿和尾矿. 块矿输送到竖炉进行焙烧, 焙烧矿输送到磨矿工序研磨成粒度合格的矿浆, 再经磁选区域的弱磁选设备进行磁选, 处理成精矿和尾矿. 强磁精矿和弱磁精矿都进入精矿大井, 进行脱水浓缩处理后输送到精矿库. 原矿采购与选矿过程如图 2 (见下页) 所示.

采购来的  $N$  种原矿  $x_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, N$  送入原矿堆场堆存  $S_i$ , 与堆场的原矿  $y_i(t)$  均化后送入选矿过程, 生产出的精矿送入精矿库  $I(t)$  作为炼铁工序的原料.

合理的原矿场堆存是确保选矿连续生产的必要条件. 堆存过多, 会增加原矿堆场的费用; 堆存过少, 则可能造成停工待料, 甚至被迫停产. 从生产的角度来说, 原料采购量受到原矿场堆存的限制, 所以不能过高; 反之, 为了保证生产正常进行, 原料采购量也不能过低. 原料采购不仅仅是单纯的原料购买, 它还与选矿生产过程密切相关. 在制定原矿采购计划时, 既要控制原矿采购成本, 又要保证选矿连续生产对原矿的需求量. 选矿企业原料采购计划与选矿生产过程密切相关, 具有多目标多约束的复杂性<sup>[7]</sup>, 难以采用现有优化方法来确定采购成本最小的原矿采购量, 只能靠计划员凭经验确定, 经常造成原矿采购量大, 采购成本高.

在保证生产工艺确定的精矿品位和原矿处理量的前提下, 使原矿堆场堆存, 精矿的即时库存合理的条件下, 如何求得使原矿采购成本最小的每月各种原矿采购量是本文要解决的问题.

### 2 面向选矿过程的各种原矿需求采购模型

面向选矿生产过程的各种原矿需求采购模型由原矿需求模型和原矿采购模型构成.

#### 2.1 面向选矿过程的原矿需求模型

原矿需求模型的目标函数为:

收稿日期 2007-03-22 收修改稿日期 2008-06-03  
Received March 22, 2007; in revised form June 3, 2008  
国家自然科学基金重点项目 (60534010), 高等学校学科创新引智计划 (B08015), 教育部科学技术研究重大项目 (30800), 辽宁省教育厅高等学校科研项目 (20060335) 资助  
Supported by Key Project of National Natural Science Foundation of China (60534010), the Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities (B08015), Key Project Ministry of Education of Chinese (30800), and Science and Research Program of the Educational Department of Liaoning Province (20060335)  
1. 辽宁大学轻纺产业学院 沈阳 110036 2. 流程工业综合自动化教育部重点实验室 (东北大学) 沈阳 110004  
1. Collage of Light Industry, Liaoning University, Shenyang 110036  
2. Key Laboratory of Integrated Automation for Process Industry (Northeastern University), Ministry of Education, Shenyang 110004  
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2009.00632

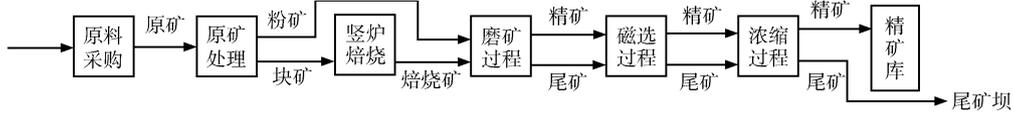


图1 选矿工艺流程图

Fig. 1 Technological flow of mineral processing

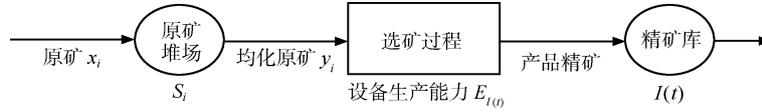


图2 选矿生产物料流程图

Fig. 2 Material production flow of mineral processing

$$\min f(t) = \max_{t=1, \dots, T} \left( \frac{I(t) - I_L}{I_H - I_L} \right) \quad (1)$$

即精矿库存平衡偏差最小。其中,  $I_L$  为精矿库存下限,  $I_H$  为精矿库存上限,  $t$  为计划期,  $I(t)$  为精矿库存量, 由下式表达

$$I(t) = I(0) + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^t y_i(t) \sum_{l=1}^2 \left( \frac{\mu_{il}}{\sigma_{il}} \right) - \sum_{t=1}^t M \quad (2)$$

其中,  $I(0)$  为精矿的原始库存;  $i$  为矿石的种类;  $\mu_{il}$  为粉矿和块矿的比例;  $\sigma_{il}$  为选矿比;  $l$  为块矿或粉矿,  $l = 1, 2$ ;  $M$  为每天精矿销售量。

约束如下:

每种原矿需求量限制由下式给出

$$\sum_{t=1}^T y_i(t) \leq S_i^H - S_i^L, \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

其中,  $y_i$  为第  $i$  种原矿的总生产需求量,  $S_i^L$  为原矿场堆存下限,  $S_i^H$  为原矿场堆存上限。

设备生产能力<sup>[8]</sup>的限制由下式给出

$$\sum_{i=1}^N \mu_{il} y_i(t) \leq E_l(t), \quad l = 1, 2; t = 1, \dots, T \quad (4)$$

其中,  $E_l(t)$  为磁选的粉矿和块矿的设备额定生产能力。

综合精矿库存限制由下式给出

$$I_L \leq I(t) \leq I_H \quad (5)$$

综合精矿品位的限制由下式给出

$$P_L \leq P(t) \leq P_H \quad (6)$$

其中,  $P_L$  为精矿品位下限,  $P_H$  为精矿品位上限,  $P(t)$  为综合精矿品位, 由式 (8) 给出。

原矿量为不小于零的数

$$y_i(t) \geq 0, \quad i = 1, \dots, N, t = 1, \dots, T, I(0) = S_0, I(t) \geq S_L \quad (7)$$

$P(t)$  综合精矿品位 = 金属含量/精矿量。表达式如下<sup>[9]</sup>

$$P(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^2 (\mu_{il} \times \rho_{il} \times \eta_{il}) y_i(t)}{\sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^2 \left( \frac{\mu_{il}}{\sigma_{il}} \right) y_i(t)} \quad (8)$$

其中,  $\rho_{il}$  为第  $i$  种矿石第  $l$  类 (粉和块) 矿的铁元素含量,  $\eta_{il}$  为金属回收率。

决策变量:  $y_i(t)$  为第  $t$  周第  $i$  种原矿的生产需求量,  $I(t)$  为第  $t$  周即时精矿库存。

$T$  周的原矿量  $y_i$  为

$$y_i = \sum_{t=1}^T y_i(t), \quad i = 1, \dots, N \quad (9)$$

## 2.2 面向原料场堆存的原矿采购模型

原矿采购模型的目标函数为

$$J = \min \sum_{i=1}^4 c_i x_i(t) \quad (10)$$

即所有原矿采购成本之和最小, 其中,  $c_i$  为第  $i$  种原料的采购成本。

约束如下:

每种原矿采购量限制由下式给出

$$x_i^L \leq x_i(t) \leq x_i^H \quad (11)$$

其中,  $x_i^L$  为原料采购量下限,  $x_i^H$  为原料采购量上限。

$$x_i^L = y_i - (S_i - S_i^L) \quad (12)$$

$$x_i^H = S_i^H - S_i \quad (13)$$

$S_i$  为第  $i$  种原矿堆场的月末堆存量, 决策变量  $x_i(t)$  为第  $i$  种原矿的采购量。

## 3 基于模糊规则调整惯性权值的粒子群算法

### 3.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法 (Particle swarm optimization, PSO) 可以表示为<sup>[10]</sup>

$$v_{id}^{t+1} = w v_{id}^t + c_1 r_1 (p_{id}^t - x_{id}^t) + c_2 r_2 (p_{gd}^t - x_{id}^t) \quad (14)$$

$$x_{id}^{t+1} = x_{id}^t + v_{id}^{t+1} \quad (15)$$

其中,  $w$  为惯性权重, 通常  $w$  的调节采用线性减小的方法, 表达式如下<sup>[11]</sup>

$$w(t) = w_{\max} - t \times \frac{w_{\max} - w_{\min}}{t_{\max}} \quad (16)$$

$w_{\max}$  是最大  $w$  的取值,  $w_{\min}$  是最小  $w$  的取值,  $t$  是当前群的迭代次数,  $t_{\max}$  是算法终止时最大迭代次数.  $x_{id}$  为粒子经历的位置,  $v_{id}$  为粒子飞行的速度,  $p_{id}$  为粒子自身经历的最好位置,  $p_{gd}$  为群体所有粒子经历的最好位置,  $c_1, c_2$  为加速常数,  $r_1, r_2$  为介于  $[0, 1]$  之间的随机数. 式 (14) 的第一部分为粒子先前的速度; 第二部分为“认知”部分, 表示粒子本身的思考; 第三部分为“社会”部分, 表示粒子间的信息共享与相互合作. 粒子群算法初始化为一组随机粒子, 然后通过迭代寻找最优解. 粒子追随两个当前最优值来更新自己的位置, 一个是粒子迄今为止找到的个体极值  $p_{id}$ ; 另外一个是一个粒子群迄今为止找到的全局极值  $p_{gd}$ .

### 3.2 基于模糊规则惯性权值 $w$ 的调整方法

惯性权重  $w$  使微粒保持运动惯性, 使其有扩展搜索空间的趋势, 有能力搜索新的区域<sup>[11]</sup>. 当  $w$  较大时, 有利于全局搜索, 当  $w$  较小时, 有利于局部搜索. 采用式 (16) 时,  $w$  的递减率不能很好地与适应值的收敛率相匹配, 即当全局搜索时,  $w$  值较小; 当局部搜索时,  $w$  值则较大, 使得算法难以快速找到最优解. 本文提出了如图 3 所示的调整  $w$  方法.  $w$  的模糊隶属度  $\mu_w(t)$  为

$$\mu_w(t) = \frac{w(t) - w_{\min}}{w_{\max} - w_{\min}} \quad (17)$$

其中  $\mu_w(t) \in [0, 1]$ , 当  $w(t)$  越大时,  $\mu_w(t)$  就越大; 当  $w(t)$  越小时,  $\mu_w(t)$  就越小; 最优适应值相对变化率  $k$  为

$$k = \frac{f(t) - f(t-10)}{f(t-10)} \quad (18)$$

其中,  $f(t)$  为选矿过程原料需求模型的目标函数, 即粒子群中第  $t$  次迭代时的最优适应值,  $f(t-10)$  为种群中第  $t-10$  次迭代时的最优适应值, 则  $k$  表示在进化 10 次迭代内最优适应值的相对变化率, 当  $k$  值大时, 说明从第  $t-10$  次迭代到第  $t$  次迭代的最优适应值的变化率大, 此时的  $w$  值应该大些比较好; 当  $k$  值小时, 说明从第  $t-10$  次迭代到第  $t$  次迭代的最优适应值的变化率小, 此时的  $w$  值应该小些比较好. 首先对当前的  $k$  值和  $\mu_w(t)$  值进行判定, 然后通过模糊规则对下次迭代的  $w$  进行自适应的调节, 这样可以更快更好地寻找到最优值.

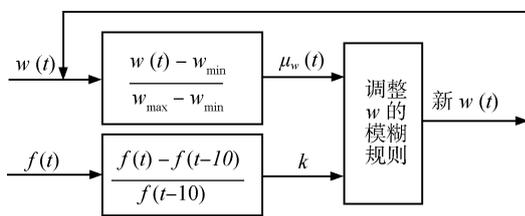


图 3 模糊控制结构

Fig. 3 Fuzzy control structure

调整  $w$  的模糊规则:

**规则 1.** IF ( $\mu_w(t) > 0.5$  and  $k > \beta$ ) or ( $\mu_w(t) \leq 0.5$  and  $k \leq \beta$ ), THEN  $w(t) = (t_{\max} - t)^{\frac{1}{2}} / t_{\max}^{\frac{1}{2}} \times (w_{\max} - w_{\min}) + w_{\min}$ .

**规则 2.** IF ( $\mu_w(t) \leq 0.5$  and  $k > \beta$ ), THEN  $w(t) = \alpha_1/4 + (w_{\max} + w_{\min})/2$ .

**规则 3.** IF ( $\mu_w(t) > 0.5$  and  $k \leq \beta$ ), THEN  $w(t) = \alpha_2/4 + w_{\min}$ .

其中,  $\beta$  相当于阈值, 当  $k > \beta$  希望  $w$  值大, 进行全局搜索;  $k < \beta$  希望  $w$  值小, 进行局部搜索. 它的取值采取凑试方法.  $\alpha_1, \alpha_2$  是规则中的参数, 为  $[0, 1]$  之间的数.

规则 1 保证了算法在  $0 \sim 150$  次迭代内进行全局搜索,  $150 \sim 200$  次迭代以上进行局部搜索; 规则 2 调整  $w$  使其在  $0.65 \sim 0.9$  之间, 进行全局搜索; 规则 3 调整  $w$  使其在  $0.4 \sim 0.65$  之间, 进行局部搜索.

## 4 采购成本最小的原矿采购量优化算法

采用原矿需求模型 (1)~(9)、原矿采购模型 (10)~(13) 和粒子群算法 (14)~(18), 可得到下列算法优化:

**步骤 1.** 初始化群的参数, 确定粒子  $x_{id}$  维度空间. 包括微粒数  $M$ , 惯性权重  $w$ , 加速常数  $c_1, c_2$ , 最大速度  $v_{\max}$  和最大迭代次数  $t_{\max}$ . 建立粒子  $x_{id}$  维度空间与各种原矿需求量  $y_i(t)$  的映射, 粒子的维度空间矩阵为  $(x_{id})_{[N \times 4]}$ , 即行对应着  $N$  种原矿, 列对应着一个月的四周 (即计划期). 即:

$$\begin{aligned} & y_1(1), \dots, y_N(1); \quad y_1(2), \dots, y_N(2) \\ & y_1(3), \dots, y_N(3); \quad y_1(4), \dots, y_N(4) \end{aligned}$$

**步骤 2.** 根据设备能力  $E_i(t)$  约束, 精矿品位  $P(t)$  约束, 库存  $I(t)$  约束及堆存  $S_i$  约束, 即式 (3)~(6) 求得  $y_i(t)$  的取值范围.

**步骤 3.** 根据适应度函数评价每个微粒. 本文适应度函数即为需求模型的目标函数  $f(t)$ , 由式 (2) 求出粒子的精矿库存  $I(t)$ , 将其代入式 (1), 评价每个粒子的适应度函数值  $f(t)$ .

**步骤 4.** 对于每个微粒, 将其适应度值与其历史最好位置  $p_{id}$  相比较, 如果比当前适应度值更优, 则将当前适应度值更新为  $p_{id}$ , 即  $f(t) = p_{id}$ .

**步骤 5.** 对于每个微粒, 将其适应度值与群体经历过的历史最佳位置  $p_{gd}$  相比较, 如果比当前群体中最好的适应度值更优, 则将其置为新的  $p_{gd}$ , 即  $f(t) = p_{gd}$ , 同时记录其索引号.

**步骤 6.** 根据模糊规则调节  $w$  值, 并根据式 (14) 和 (15) 更新各微粒的位置和速度.

**步骤 7.** 由步骤 5 迭代生成的速度和位置进行解的更新, 即调整各种原矿需求量  $y_i(t)$ .

**步骤 8.** 对迭代产生的新的粒子种群进行适应度评价. 判断所得到粒子的位置  $y_i(t)$  是否在其取值约束范围内, 以及算法是否达到最大迭代次数  $Iter_{\max} = 200$ , 即  $Iter > Iter_{\max}$ . 若满足这两者条件, 则转到步骤 9, 否则返回步骤 4 继续迭代.

**步骤 9.** 算法迭代停止时, 全局极值  $f(t) = p_{gd}$  所对应的  $y_i(t)$  即为问题的最优解.

**步骤 10.** 将步骤 9 求得的  $y_i(t)$  带入式 (9), 即求得每月原矿需求量  $y_i$ .

**步骤 11.** 将步骤 10 求得的  $y_i$  代入式 (12)、(13), 以确定原矿采购量的范围  $[x_i^L, x_i^H]$ .

**步骤 12.** 运用经典线性规划优化法, 求得满足目标函数 (10) 的  $x_i(t)$  的值, 即每个月各种原矿的采购量.

## 5 仿真实验

某选矿厂的原矿种数  $N$  为 4, 即 4 种原矿. 实际数据由表 1 的原矿综合指标; 表 2 给出的原矿采购成本, 原矿场堆存约束, 月末原矿场堆存和表 3 的精矿的库存和品位的约束

组成.

表 1 原矿综合指标

Table 1 Raw ores comprehensive indices

原矿种类	$\mu_{i1}(\%)$	$\mu_{i2}(\%)$	$\rho_{i1}(\%)$	$\rho_{i2}(\%)$	$\eta_{i1}(\%)$	$\eta_{i2}(\%)$	$\sigma_{i1}$	$\sigma_{i2}$
$x_1$	64	36	34	31	79.55	66.13	2.1	2.3
$x_2$	0	100	0	28	66.13	66.13	0	2.3
$x_3$	0	100	0	48	78.3	78.3	0	1.45
$x_4$	60	40	48	47.3	84.8	84.8	1.45	1.45

表 2 原矿采购成本, 堆存限制和某月末原矿堆存

Table 2 Raw ores purchasing cost, raw ores yards storage constrain and raw ores yards storage

原矿种类	原矿采购成本 (元/吨)	原矿堆存 $[S_i^L, S_i^H]$ (吨)	月末堆存 $S_i$
$x_1$	129	6 000 ~ 406 000	17 640
$x_2$	16	2 000 ~ 16 000	6 900
$x_3$	1	4 000 ~ 30 000	5 640
$x_4$	8	2 000 ~ 14 000	6 150

表 3 精矿的库存和品位的限制

Table 3 Concentrate inventory and grade constrain

精矿库存 (吨/天)	精矿库存限制 (吨) $[I_i^L, I_i^H]$	精矿品位限制 (%) $[P_i^L, P_i^H]$
6 000	6 000 ~ 300 000	52.2 ~ 54.2

采用表 1~3 的实际数据, 分别用三种不同调节惯性权重  $w$  的粒子群优化算法: 取定值  $w$  的标准粒子群优化 (Standard particle swarm optimization, SPSO), 线性递减  $w$  的线性粒子群优化 (Linear particle swarm optimization, LPSO) 及基于模糊规则调节  $w$  的模糊粒子群优化 (Fuzzy particle swarm optimization, FPSO) 求解原矿生产需求量来进行算法比较. 算法仿真实验应用 C 语言, 运行于 Windows XP 操作系统的 Pentium IV (1.6 G/256 M) PC 机上, 算法参数设置如下: 微粒数  $M = 20$ ,  $w$  的初值为  $w_{\max} = 0.9$ ,  $w_{\min} = 0.4$ ,  $c_1 = c_2 = 1.4$ ,  $v_{\max} = 2$ ,  $t_{\max} = 200$ ,  $\beta = 0.05$ , 并在  $[0, S_i^H - S_i^L]$  范围内随机产生微粒的位置. SPSO 用时 5.2365 s, LPSO 用时 5.0287 s, FPSO 用时 4.7451 s.

图 4 和图 5 分别给出三种粒子群优化算法的  $w$  和适应度  $f(t)$  值变化曲线. 从中可以看出: FPSO 全局收敛性的收敛速度和收敛精度较其他两种方法要好.

表 4 给出采用 FPSO 算法所求得一个月的 4 种原矿采购量和原采购计划确定的实际原矿采购量及费用.

表 4 原采购计划和 FPSO 方法的比较

Table 4 Comparison of primal purchasing plan and FPSO

原矿种类	原采购计划		FPSO	
	采购量 (吨)	费用 (元)	采购量 (吨)	费用 (元)
$x_1$	399 335	51 514 215	391 500	50 503 500
$x_2$	8 984	143 744	6 618	105 888
$x_3$	24 775	24 775	9 429	9 429
$x_4$	2 592	20 736	4 693	37 544
合计	435 686	51 703 470	412 240	50 656 361

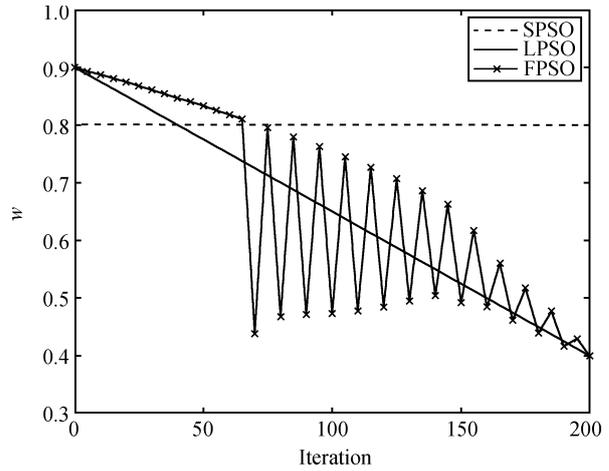


图 4 惯性权重  $w$  变化的仿真

Fig. 4 Simulation of the change of inertia weight  $w$

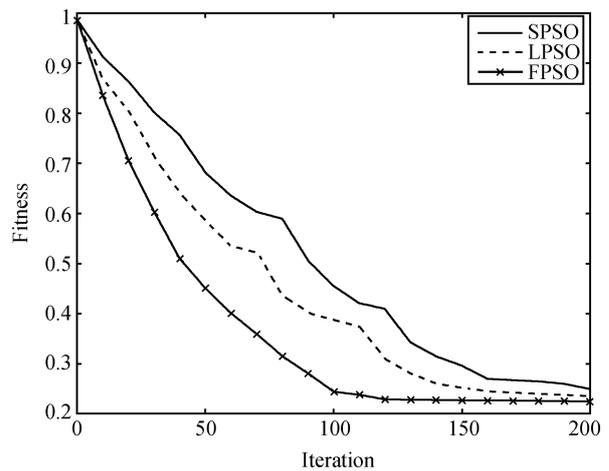


图 5 不同 PSO 算法的仿真

Fig. 5 Simulation of different PSO

从表 4 可以看到本文方法较原采购计划确定的原矿采购量明显减少, 节省原料采购成本 104.7 万元/月. 按上述方法依次类推可分别算出后 11 个月的原矿采购量及费用. 鉴于篇幅所限, 直接给出年节约成本 1 238.5 万元/年.

## 6 结论

本文提出的基于模糊规则的惯性权值调整方法动态地跟踪搜索过程, 提高了搜索能力, 改善了优化算法的收敛速度和收敛精度. 将改进的粒子群优化算法应用于选矿企业原料采购计划中, 提出了确定采购成本最小的原矿采购量优化方法, 该方法由原矿需求模型和原矿采购模型和一个改进的粒子群优化算法组成. 采用某选矿厂实际数据的仿真实验结果表明: 用本文提出的方法做出的原料采购计划比人工凭经验做出的原采购计划确定的原矿采购量和采购成本明显减小.

## References

- Everett J E. Iron ore production scheduling to improve product quality. *European Journal of Operational Research*, 2001, **129**(2): 355-361
- Fan T J, Li H Y, Xi D Z. Optimization of planning and scheduling for phosphor-chemical enterprises. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Service Operations*

- and Logistics, and Information. Washington D. C., USA: IEEE, 2006. 689–695
- 3 Gao Zhen, Tang Li-Xin, Tao Wei, Xiao Xin-Hua. Raw materials purchasing plan model for large-scale steel-iron enterprises. *Journal of Systems Engineering*, 2003, **18**(6): 566–570  
(高振, 唐立新, 陶炜, 肖新华. 大型钢铁企业原料采购计划模型. 系统工程学报, 2003, **18**(6): 566–570)
  - 4 Gao Zhen, Tang Li-Xin. Combine column generation with GUB to solve the steel-iron raw materials purchasing lotsizing problem. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(1): 20–25  
(高振, 唐立新. 列生成与 GUB 相结合求解钢铁原料采购批量问题. 自动化学报, 2004, **30**(1): 20–25)
  - 5 Yu Yu-Gang, Liang Liang, Yu Yan, Huang G Q. Pareto optimization and its realization in VMI system considering pricing, production capacity and raw material procurement. *Systems Engineering – Theory and Practice*, 2005, **25**(4): 1–7  
(余玉刚, 梁樑, 余雁, Huang G Q. 考虑定价、生产能力和原料采购的 VMI 系统 Pareto 最优及其实现. 系统工程理论与实践. 2005, **25**(4): 1–7)
  - 6 Huang X L, Chu Y G, Hu Y, Chai T Y. The production process management system for production indices optimization of mineral processing. In: Proceedings of the 16th IFAC World Congress. Prague, Czech: Elsevier, 2005. 4–8
  - 7 Liang Bin, Liu Wei. On dynamic cost control technology of ore-dressing production process. *Control Engineering of China*, 2005, **12**(6): 567–569  
(梁斌, 刘威. 铁矿选矿生产过程动态成本控制技术. 控制工程. 2005, **12**(6): 567–569)
  - 8 Huang Xiao-Ling. *Intelligent Manufacturing Execution Systems of Ore Dressing*. Shenyang: Liaoning University Press, 2006  
(黄肖玲. 智能选矿制造执行系统. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2006)
  - 9 Huang Xiao-Ling, Ding Jin-Liang, Chai Tian-You. Study of scheduling based on production indices optimization for mineral processing. *Journal of Systems Engineering*, 2006, **21**(2): 136–142  
(黄肖玲, 丁进良, 柴天佑. 面向生产指标优化的选矿过程调度研究. 系统工程学报, 2006, **21**(2): 136–142)
  - 10 Kennedy J, Eberhart R C, Shi Y. *Swarm Intelligence*. San Francisco: Morgan Kaufman Publishers, 2001
  - 11 Shi Y H, Eberhart R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization. In: Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation. Seoul, Korea: IEEE, 2001. 101–106

黄肖玲 博士, 辽宁大学轻型产业学院教授. 主要研究方向为流程工业制造执行系统、生产计划与调度、智能优化方法. 本文通信作者.

E-mail: hxiao0@yahoo.com

(HUANG Xiao-Ling Ph.D., professor at the College of Light Industry, Liaoning University. Her research interest covers manufacturing execution system, production planning and scheduling, and evolutionary computation and applications. Corresponding author of this paper.)

柴天佑 中国工程院院士, 东北大学教授. 主要研究方向为自适应控制、智能解耦控制、流程工业过程综合自动化.

E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn

(CHAI Tian-You Academician of Chinese Engineering Academy and professor at Northeastern University. His research interest covers adaptive control, intelligent control, and integrated automation of industrial process.)