

基于改进烟花算法的钢铁企业原材料采购优化^①

雷兆明^② 徐双丽^③ 廖文喆 刘敬华

(河北工业大学控制科学与工程学院 天津 300130)

摘 要 针对钢铁企业原材料采购成本偏高的问题进行了原材料采购优化研究。考虑到导致原材料采购成本偏高的因素是采购提前期不固定、原材料价格波动大等,建立了以降低采购、运输和库存成本为目标的整数规划模型,并提出了一种改进的烟花算法(FWA)对问题进行求解。该算法采用 Lévy 飞行搜索算子改进 FWA 搜索性能,利用惯性权重优化其收敛速度,使改进后的 FWA 具有收敛速度快、全局寻优能力强等优点。该改进的烟花算法叫 LFWA。最后通过一个应用实例与其他算法进行了对比,进一步验证了该算法的有效性。

关键词 钢铁企业, 采购优化, 烟花算法(FWA), Lévy 飞行, 惯性权重

0 引言

钢铁企业的原材料采购成本直接影响着企业的整体利润。因此建立原材料采购成本的整数规划模型,并利用智能优化算法对其进行求解是降低原材料采购成本的有效方法^[1]。针对这一问题,国内外专家学者做了大量研究。文献[2]为解决钢铁企业原材料消耗的随机性,提出了一种采用班轮运输的原材料库存策略。文献[3]针对原材料的采购价格和采购计划的不确定性,建立了适合中小型钢铁企业的采购库存优化模型,模型兼顾了采购、运输和库存这三大成本。文献[4]针对现代仓库拣货效率的问题,对拣货路径进行了优化,并使用蚁群算法对问题进行了求解。

上述优化策略虽然在一定程度上缓解了原材料采购成本居高不下的问题,但并没有深入分析多种因素相互作用对采购成本的影响。本文通过深入分析现有的研究成果,结合问题的具体特点,在模型中加入了采购提前期和价格波动等影响因素,简化了库存模型,优化了订货点和安全库存模型,从而建立

了以采购成本最小化为目标的整数规划模型。新建模型综合考虑了原材料价格波动、采购提前期不固定、运输及库存成本高等影响因素。通过分析问题结构,综合模型特点,本文提出了一种改进的烟花算法对问题进行求解,并通过一个实例验证了该算法的有效性。实验结果表明,该算法收敛速度快,全局搜索性能好。

1 问题描述及数学建模

1.1 问题描述

钢铁企业主要原材料包括铁矿石、焦炭、石灰石及一些化工产品等,而钢铁企业对这些原材料的需求是非常巨大的,所以原材料在采购时需要分批进行采购。假设有 n 种原材料,分 n 批采购,则可将采购周期分为 n 段,如图 1 所示。

相关假设如下:

- (1) 钢厂的生产不间断,在采购周期内钢厂的生产活动也是连续的;
- (2) 在同一周期内同一种原材料最多紧急订货

① 河北省科技支撑计划(13210307D)资助项目。
② 男,1974 年生,博士生,讲师;研究方向:工业系统控制及优化;E-mail: 1263213955@qq.com
③ 通信作者,E-mail: 18222852865@163.com
(收稿日期:2017-11-06)

一次;

(3) 一种原材料有多家供应商,所以市场原材料的价格存在非周期性波动,假设原材料的买进过程非常短,则买进前后原材料价格保持不变;

(4) 不考虑突发情况,并且保证原材料在采购周期结束时都能及时送达。

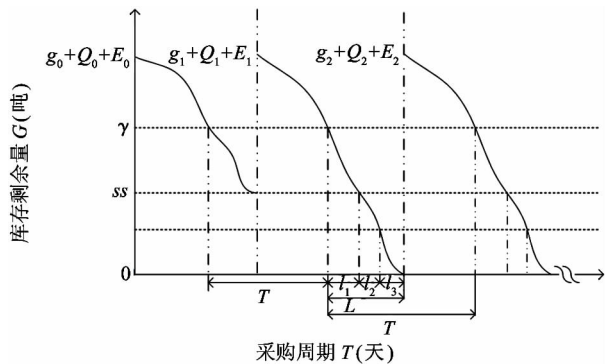


图1 采购周期图

1.2 数学模型

原材料采购成本优化问题即求取采购成本 C_p 、运输成本 C_s 和库存成本 C_ω 的总购买成本,这其中包括一次性购买费用 F 和紧急采购费用 E 。

故总采购成本数学模型如下式所示:

$$\min C = C_p + C_s + C_\omega \quad (1)$$

具体描述如下:

$$C_p = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n x_{ik} Q_{ik} q_{ik} + \sum_{i=1}^n F_i + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n y_k E_i e_i \quad (2)$$

$$C_s = \sum_{i=1}^n c_i \left(\sum_{k=1}^n y_k E_i + \sum_{k=1}^n x_{ik} Q_{ik} \right) \quad (3)$$

$$C_\omega = \sum_{i=1}^n \omega_i \left[\sum_{k=1}^n y_k E_i + \sum_{k=1}^n (g_{ik} + x_{ik} Q_{ik}) - \lambda_i T \right] \quad (4)$$

$$E_i = \lambda_i T - \sum_{k=1}^{n-1} (g_{ik} + x_{ik} Q_{ik}) \quad (5)$$

x_{ik} 为随机变量,当第 i 种原材料在第 k 段购买时为 1,否则为 0; Q_{ik} 为第 i 种原材料在第 k 段购买的数量为决策变量; q_{ik} 为第 i 种原材料在第 k 段的价格; F_i 为第 i 种原材料一次购买所花费的固定费用; E_i 为第 i 种原材料的紧急购买量; e_i 为第 i 种原材料的紧急购买价格; λ_i 为第 i 种原材料在采购周期内的平均需求率; L 为采购提前期; y_k 为与 k 有关

的随机变量,当 $k = n$ 时为 1,否则为 0; c_i 为第 i 种原材料的单位运输成本; ω_i 为第 i 种原材料的单位库存成本; g_{ik} 为第 i 种原材料在第 k 段内的剩余库存量; T 为采购周期。

约束条件如下:

$$\sum_{k=1}^n (g_{ik} + x_{ik} Q_{ik}) + \sum_{k=1}^n y_k E_i - \lambda_i T \geq 0 \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{ik} Q_{ik} + \sum_{k=1}^n y_k E_i \geq 0 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^n Q_{ik} q_{ik} + \sum_{k=1}^n y_k E_i e_i \right) \leq C_c \quad (8)$$

$$0 \leq E_i \leq \sum_{k=1}^n Q_{ik} \quad (9)$$

$$\sum_{k=1}^n y_k E_i + \sum_{k=1}^n Q_{ik} = \bar{Q}_i \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n \bar{Q}_i \leq Q \quad (11)$$

其中,式(6)是保证在采购周期内生产不间断,且要保证 $g_{ik} \geq 0$; 式(7)中的等号成立的条件是库存余量满足本周期的生产需求; C_c 为原材料的最大预算成本; 式(9)表示紧急采购量不能满足生产要求,只能暂时缓解生产需要; $\bar{Q}_i$ 为第 i 种原材料在本次采购中购买的总量; Q 为仓库最大容量。

原材料订货点和安全库存如下式所示:

$$\gamma_i = L_i (1 - \alpha_i) \quad (12)$$

$$ss = \gamma_i - L_i \lambda_i \quad (13)$$

其中, α_i 为第 i 种原材料的供应保障率。

由上述建模过程可以看出,影响降低采购成本的因素众多,每种影响因子之间相互作用,耦合性较强,用普通的算法很难解决这一难题,所以本文采用改进烟花算法求解该模型,从而对采购成本进行优化,达到降低采购成本的目的。

2 改进烟花算法

2.1 烟花算法

烟花算法 (firework algorithm, FWA)^[5] 是 2010 年由 Tan 等根据实际烟花的爆炸提出的一种新型的群智能算法。其搜索机制为随机生成 N 个烟花作为初始种群,每个烟花根据一定的爆炸幅度 A 随机产生 S 个烟花,然后再依据选择策略选出最优个体,

最后随机选取其他 $N - 1$ 个火花进入下一次的迭代,循环往复直到得到全局最优解。

FWA 的粒子更新公式如下式所示:

$$\Delta x_i = x_i + A_i rand(-1, 1) \tag{14}$$

其中, A_i 为第 i 个个体的爆炸幅度; $rand(-1, 1)$ 为均匀随机数。

爆炸幅度如下式所示:

$$A_i = A \frac{f(x_i) - f(x_i)_{\min} + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (f(x_i) - f(x_i)_{\min} + \varepsilon)} \tag{15}$$

火花产生个数的公式为

$$S_i = m \frac{f(x_i)_{\max} - f(x_i) + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (f(x_i)_{\max} - f(x_i) + \varepsilon)} \tag{16}$$

变异火花数由式

$$x_i = x_i G \tag{17}$$

求得,其中 S_i 为火花个数, G 为服从高斯分布的随机系数即 $G \sim N(-1, 1)$ 。

选择策略如下式所示:

$$R(x_i) = \sum_{j \in K} \|x_i - x_j\| \tag{18}$$

$$p(x_i) = \frac{R(x_i)}{\sum_{j \in K} R(x_j)} \tag{19}$$

其中, $R(x_i)$ 为任意两个个体之间的欧式距离; K 为高斯变异产生的火花和爆炸产生的火花的集合; $p(x_i)$ 为个体采用轮盘赌方式的被选择的概率。

2.2 Lévy 飞行基本理论

Lévy 飞行是一种服从 Lévy 分布的随机搜索机制,它的优点是可以很好地跳出局部最优,近年来许多专家学者在优化策略中引用 Lévy 飞行搜索算子来改进算法的性能从而使算法得到适宜的全局最优解^[6,7]。

Lévy 飞行的基本位置更新公式为

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \alpha \oplus Levy(\beta) \tag{20}$$

式中 $x_i(t)$ 表示第 i 个解在第 t 代的位置, $i = 1, 2, \dots, n$; $t = 1, 2, \dots, n$; α 是控制步长的常数,通常 $\alpha = 1$, 此时 α 的取值范围为 $(-1, 1)$, $\oplus$ 表示内积运算; $Levy(\beta)$ 为随机搜索路径,服从参数为 β 的 Lévy 分布,式为

$$Levy(\beta) = \left[\frac{\Gamma(1 + \beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma(1 + \beta)/2\beta 2^{(\beta-1)/2}} \right]^{1/\beta} \tag{21}$$

式中的 Γ 为标准的 Gamma 函数。

2.3 惯性权重

为了加快收敛速度,提高算法的寻优性能,借鉴文献[8],在传统 FWA 的基础上引入非线性惯性权重 ω , 惯性权重会随着评估次数的增加而减小。惯性权重大则算法的全局寻优能力强,惯性权重小,则有利于局部寻优,从而提高算法的收敛速度。

惯性权重公式为

$$\omega = \left(\frac{1}{2}\right)^y \tag{22}$$

式中 y 表示评估次数, y 越大 ω 就越小,则改进后的算法收敛速度越快。

2.4 改进烟花算法

烟花算法(FWA)自提出以来备受国内外专家学者的关注,从而对基本 FWA 展开了细致而深入的研究。但随着研究的深入基本 FWA 的各种不足逐渐显露出来,对此包括 Tan 在内的许多专家学者对 FWA 进行了改进,如在基本 FAW 的基础上,引入了差分算法的变异算子、交叉算子和选择算子,从而形成了差分演化—烟花混合算法等^[9-11]。这些改进后的算法广泛应用到各行各业中,但由于改进后的算法针对性比较强(如差分演化—烟花混合算法主要针对多目标优化问题),所以不能很好地解决本文提出的问题。通过分析问题的结构结合算法的特点,本文选择 Lévy 飞行和惯性权重来改进 FWA,得到了改进的烟花算法 LFWA。

引入 Lévy 飞行搜索算子和惯性权重后的位置更新公式由式(14)变为下式:

$$\Delta x_i = \omega x_i + \alpha levy(\beta) \tag{23}$$

用 FWA 时,火花的位置是根据烟花爆炸决定的,但由于每个火花的位移量相同(都是 $A_i rand(-1, 1)$),所以降低了种群的多样性,为此式(23)中用 $\alpha Levy(\beta)$ 来代替 $A_i rand(-1, 1)$, 这样既保留了 FWA 自身的特点又提高了局部搜索的多样性。又利用非线性惯性权重 ω 改进了算法的收敛速度,这样,使改进后的烟花算法不但保留了自身的优点,也兼得了收敛速度快、全局寻优能力强的特点。

2.5 改进算法流程

改进后算法的优化求解流程步骤如下:

步骤 1:初始化参数 $N, m, a, b, y, \hat{A}, t_l, div, p$;

步骤 2:对每一个个体 x_i 求解适应度值 $f(x_i)$, 并求其最大值 $f(x_i)_{\max}$ 和最小值 $f(x_i)_{\min}$;

步骤 3:在 div 维空间搜索空间中初始化 N 个烟花的初始位置,令 $t = 1$;

步骤 4:根据式 (15)、(16) 计算本次迭代过程中每个烟花产生的火花数及爆炸幅度,并由式 (17) 计算产生的高斯火花数;

步骤 5:用式 (18) 计算个体间的欧氏距离,并由式 (19) 计算个体被选择的概率;

步骤 6:根据新的粒子更新公式 (23) 来更新粒子位置,并按适应度函数值的大小选出 N 个粒子作为下一代初始烟花,置 $t = t + 1$;

步骤 7:若 $t < t_l$, 则返回步骤 4, 否则停止运算, 输出最优解。

改进算法流程图如图 2 所示。

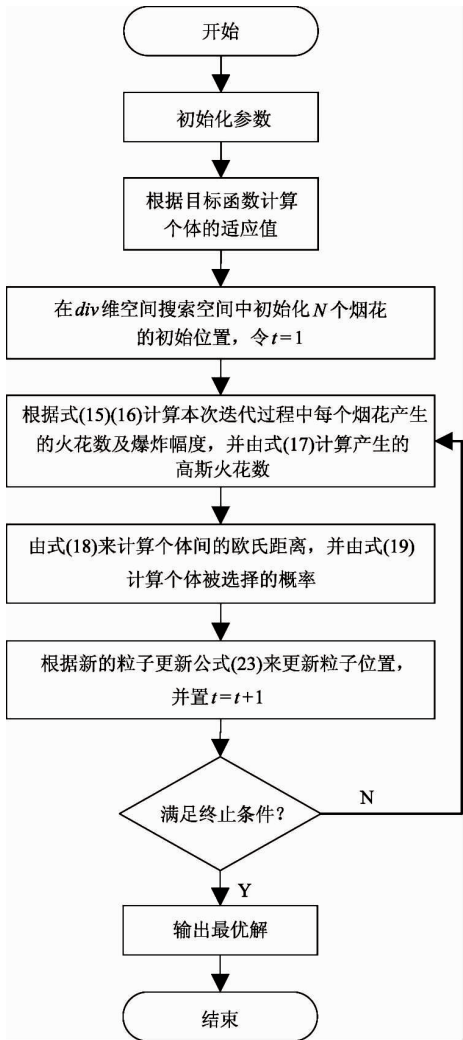


图 2 改进算法流程图

2.6 算法对比

将本文提出的 LFWA 与文献 [12] 中的带有引力搜索算子的烟花算法 (FAGSO) 和文献 [13] 中的混沌烟花算法 (CPAFWA) 及 FAW 进行了比较, 设置迭代次数为 1000, 各算法独立运行 20 次, 运行结果如图 3 所示, 其详细结果如表 1 所示。表 1 中 avg 为迭代 20 次时的函数值, $\bar{t}/s$ 为达到最优的平均时间, $F\bar{A}$ 为达到最优的平均迭代次数。

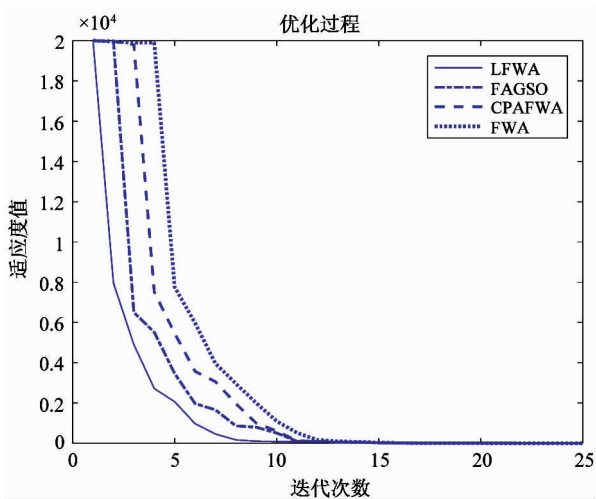


图 3 优化对比图

表 1 算法对比结果

	avg	$F\bar{A}$	$\bar{t}/s$
FWA	1.96e-229	16	36.5
CPAFWA	0	14	30.1
FAGSO	0	13	28.2
LFWA	0	10	24.3

从图 3 中可以直观地看出本文提出的算法收敛速度是最快的, 表 1 中的数据显示在运算结果上 LFWA 与 FAGSO 和 CPAFWA 相同, 均优于 FWA, 在收敛速度和运行时间上, LFWA 优于其他三种算法, 从而验证了本文提出算法的有效性。

3 实例分析及结果

3.1 编解码

考虑到钢铁企业的实际采购情况, 本文采用整数编码方式, 这种编码方式的特点是在同一个

时间段内同时对两种原材料进行采购,如图 4 所示。

1	2	1
---	---	---

图 4 整数编码

图 4 表示 1 号和 3 号原材料在第一批次购买,2 号原材料在第二批次进行购买。

3.2 参数设置及数据

经反复仿真实验设置参数如下:种群大小 N 为 5,常数 m 为 50,参数 $a = 0.04, b = 0.8$,爆炸幅度 $\hat{A}$

$= 40$,高斯变异火花数 $p = 5$,评估次数 y 为 5000 次,迭代次数 n_1 为 1000 次,每个函数独立运行次数 n_2 为 20 次,函数在空间 $d = 30$ 维上运行。根据钢铁的实际情况设定采购周期为 150 天,分为 5 段进行采购,紧急采购价格是实际价格的 1.15 倍。

本文采用的实验数据均来自某企业,根据企业的实际情况,选择了 5 种原材料进行研究分析,其价格预测表如表 2 所示,单位为元/吨。原材料参数如表 3 所示,其中采购总成本 C_p 为 300 万元,最大库存量 Q 为 200 万吨,其它符号与数学模型符号一致。

表 2 原材料预测价格表(元/吨)

	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
铁矿石	650.07	565.13	556.23	634.45	651.45
焦炭	1513.07	1420.00	1613.23	1806.50	1722.13
石灰	515.00	380.89	451.23	475.32	305.00
重油	3370.00	2400.00	2530.00	2450.00	3350.00
废钢	1220.00	1189.00	1345.00	1506.00	1389.00

表 3 原材料参数表

	铁矿石	焦炭	石灰	重油	废钢
L_{ik} (天)	90	90	120	90	120
F_i (万元)	14.90	18.00	9.90	21.76	15.01
c_{ik} (万元)	20.65	9.98	5.45	20.06	13.11
ω_{ik} (万元)	9.68	11.02	9.55	15.19	10.44
g_{ik} (万吨)	6.90	26.00	5.20	9.80	25.10
λ_i (万吨)	0.30	0.20	0.08	0.10	0.20

3.3 实验结果分析

将采购成本的数学模型和 LFAW 相结合并进行编码操作得到采购顺序为 $2 \rightarrow 1 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3$,经由解码得到最优采购量如表 4 所示, $best$ 表示最优采购量,单位为万吨,最优成本为 260.386 万元。

表 4 最优采购量

	铁矿石	焦炭	石灰	重油	废钢
$best$ (万吨)	36.99	30.01	24.12	21.62	35.22

表 4 给出了 LFWA 对问题求解得到的最优采购量。为了充分说明算法的有效性和先进性,本文将 LFWA 与经典粒子群算法 (PSO) 和经验法进行对比,求解结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出,在满足生产需要的前提下,相较于 PSO 和经验法,使用本文提出的 LFWA 可以得到最低的最优采购量,相应的采购成本也为最低。

根据调查,某钢铁企业实际的采购成本约为 290 万元,PSO 求解得到的采购成本约为 270 万元,本文提出的算法运算结果比实际人工运算结果低 29.6 万元,比 PSO 运算结果低 9.6 万元,这样每个

采购周期的采购成本节约 30 万元,一年节约采购总成本约 90 万元。

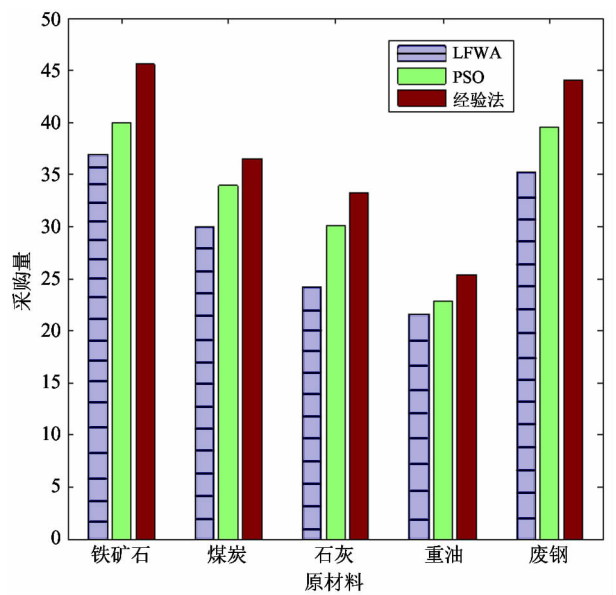


图 5 最优采购量

4 结 论

本文主要论述了为了降低钢铁企业原材料的采购成本,考虑到采购提前期、价格波动等多种因素对采购成本的影响,建立了符合钢铁行业实际应用的整数规划模型。为了求解该模型并结合问题的具体特点提出了一种改进烟花算法 LFAW。该算法主要使用 Lévy 飞行搜索算子和惯性权重对 FAW 进行了改进,使改进后的烟花算法具有收敛速度快、全局寻优性能好等特点,并通过与 FAGSO、CPAFWA 以及 FAW 进行对比,证明该算法的有效性。最后通过实验算例对比其他方法证明本文提出的 LFWA 能够在提高员工工作效率的同时降低原材料采购成本。

但是,影响钢铁企业原材料采购成本的因素很多,除去自身的影响因素外同时还要考虑外力的影响,比如恶劣的天气、拥堵的交通都会增加运输的费用,再比如订单的减少会使原材料积压从而导致库存费用的增加,这都给降低原材料采购成本增加了难度。所以采购资源的调度是未来需要进一步研究的课题。

参考文献

[1] Kartal H, Oztekin A, Gunasekaran A, et al. An integrated decision analytic framework of machine learning with multi-criteria decision making for multi-attribute inventory classification[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2016, 101(1):599-613

[2] 贺国先. 基于班轮供应的生产企业原材料库存策略仿真优化[J]. *系统仿真学报*, 2014, 26(6):1400-1406

[3] 伍景琼, 蒲云, 伍锦群. 价格波动下钢铁企业原材料采购多期优化模型[J]. *控制与决策*, 2013, 28(9):1382-1388

[4] 刘建胜, 熊峰, 陈景坤, 等. 基于蚁群算法的双分区仓库拣货路径的优化[J]. *高技术通讯*, 2017, 27(1):72-80

[5] 谭营. 烟花算法引论[M]. 北京:科学出版社, 2015. 13-31

[6] Sharma H, Bansal J C, Arya K V, et al. Lévy flight artificial bee colony algorithm[J]. *International Journal of Systems Science*, 2016, 47(11):2652-2670

[7] Li X T, Yin M H. A hybrid cuckoo search via Lévy flights for the permutation flow shop scheduling problem[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(16):4732-4754

[8] 尚亚菲, 刘雪英, 贾敏南. 引入惯性权重的烟花算法[J]. *内蒙古工业大学学报*, 2016(3):168-177

[9] Kim D W, Park G J, Lee J H, et al. Hybridization algorithm of fireworks optimization and generating set search for optimal design of IPMSM[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, 53(6):1-4

[10] 吴琼, 曾庆鹏. 基于多目标烟花算法的关联规则挖掘[J]. *模式识别与人工智能*, 2017, 30(4):365-376

[11] Zhang B, Zheng Y J, Zhang M X, et al. Fireworks algorithm with enhanced fireworks interaction. [J]. *IEEE/ACM Transactions on Computational Biology & Bioinformatics*, 2017, 14(1):42-55

[12] 朱启兵, 王震宇, 黄敏. 带有引力搜索算子的烟花算法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(10):1853-1859

[13] 包晓晓, 叶春明, 计磊, 等. 改进混沌烟花算法的多目标调度优化研究[J]. *计算机应用研究*, 2016, 33(9):2601-2605

Optimization of the material purchasing for steel enterprises based on an improved fireworks algorithm

Lei Zhaoming, Xu Shuangli, Liao Wenzhe, Liu Jinghua

(School of Control Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

Abstract

The optimization of steel enterprises' raw material purchasing is studied to reduce the material purchasing cost. Considering that the factors leading to the higher cost for raw material purchasing are the uncertain procurement lead time, the fluctuation of raw material prices, etc., an integer programming model is established for reducing the costs in procurement, transport and inventory, and an improved fireworks algorithm (FWA) is proposed to solve the problem. The improved FWA uses a Lévy flight searching operator to improve the global searching ability of traditional fireworks algorithms and uses an inertia weight to improve the rate of convergence, so it is called the LFWA. The LFWA is characterized by the fast convergence and good global search capability, which can achieve the optimization quickly. Finally, The effectiveness of the proposed algorithm is verified by a comparison with other algorithms through a test example.

Key words: steel enterprise, procurement optimization, firework algorithm (FWA), Lévy flights, inertia weight