

研究论文

炼焦生产过程质量产量能耗的集成优化控制

王 伟, 吴 敏, 雷 琪, 曹卫华

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 针对炼焦生产过程强非线性、大时滞等特点, 基于过程参数的主元分析和灰色关联分析, 建立了焦炭质量、产量及焦炉能耗的神经网络预测模型和以焦炭质量为约束条件, 产量、能耗为目标函数的优化控制模型。提出一种融合模糊 C 均值聚类粗优化和差分进化细优化的集成优化控制方法, 进行过程参数的优化并给出操作优化指导。系统仿真结果表明, 该方法能有效地抑制工况的波动, 达到高产、优质、低耗的生产目标, 为复杂工业过程的建模和优化控制提供了一种新思路。

关键词: 炼焦生产过程; 神经网络预测模型; 优化控制模型; 模糊 C 均值聚类; 差分进化; 集成优化控制

中图分类号: TP 273⁺.5

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 07-1749-06

Integrated optimal control of coke quality, coke yield and energy consumption for coking process

WANG Wei, WU Min, LEI Qi, CAO Weihua

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: To deal with the problem of the strong non-linearity and large time delay in the coking process, the neural network prediction model for coke quality and coke yield, energy consumption of coke oven and the optimal control model with coke quality as constraint, coke yield and energy consumption as objective function were established based on principal components analysis and grey relational analysis of the process parameters. An integrated optimal control method, which combined fuzzy C-means clustering to realize coarse optimization and combined differential evolution to realize fine optimization, was proposed to optimize the process parameters and provide guidance for operation optimization. The simulation results showed that the method was efficient in restricting the fluctuation of operating conditions to achieve the production target of high coke yield and good coke quality at low energy consumption. It provided a new idea for the modeling and optimization control of complex industrial processes.

Key words: coking production process; neural network prediction model; optimization control model; fuzzy C-means clustering; differential evolution; integrated optimal control

引 言

炼焦生产过程是一个复杂的物理化学反应过

程, 实际工艺中涉及多个过程, 如焦炉加热燃烧过程、焦炉煤气集气过程、装煤过程、推焦-拦焦-熄焦过程和综合回收过程等, 具有强非线性、大时滞

2008-04-15 收到初稿, 2008-04-30 收到修改稿。

联系人: 吴敏。第一作者: 王伟 (1982-), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目 (2006AA04Z172);

国家杰出青年科学基金项目 (60425310)。

Received date: 2008-04-15.

Corresponding author: Prof. WU Min. **E-mail:** min@csu.edu.cn

Foundation item: supported by the High-tech Research and Development Program of China (2006AA04Z172) and the National Science Fund for Distinguished Youth Scholars of China (60425310).

等特点^[1-2]。

炼焦生产过程的优化控制目标是在焦炭质量满足要求的前提下,使焦炭产量最大、焦炉能耗最小。由于受到人工经验等因素的制约,操作人员很难对质量产量能耗进行客观的评价,因而影响到优化控制的实现。另一方面,炼焦生产过程优化控制目标和过程参数之间存在严重滞后,采用传统方法或单一的控制很难获得令人满意的控制效果。目前,国内外关于炼焦生产过程的研究大多停留在单元优化控制水平^[3-8],众多的生产状态信息通常缺乏有效的集成而分散于各局部生产过程,使得控制与决策取得的效益是局部的,难以保证企业在全局范围内获得更大效益。因此,迫切需要提出新的方法来解决炼焦生产过程质量产量能耗的优化控制问题。

炼焦生产的多过程、多目标,使其质量产量能耗优化控制目标函数的求解问题属于非线性多目标多约束优化问题,传统的寻优方法处理此类问题通常效果不佳。目前,国内外出现的乘子罚函数法^[9-11]、权重系数可变的线性加权法^[12-13]、模糊 C 均值聚类法^[14]、差分进化算法^[15-16],为解决非线性多目标多约束的优化问题提供了新的方法。

本文以炼焦生产过程为例,从全局优化的角度考虑,提出了一种基于质量产量能耗预测模型的集成优化控制方案,解决质量产量能耗的优化控制问题。首先采用改进的 BP 神经网络建立炼焦生产过程质量产量能耗预测模型和以质量为约束条件,产量、能耗为目标函数的优化控制模型;然后采用权重系数可变的线性加权法将多目标优化问题转化为单目标优化问题,采用乘子罚函数法将描述的多约束优化问题转化为一个无约束的优化问题,并用基于模糊 C 均值聚类和改进差分进化算法的集成优化算法进行求解;最后给出在实验室仿真平台上的仿真结果分析和结论,验证方法的有效性。

1 机理分析

炼焦生产过程最直接的控制目标是焦炭质量、产量和焦炉能耗指标。焦炭质量指标包括水分、挥发分、灰分、硫分、抗碎强度、耐磨强度。焦炭产量指标按照通常标准以 $t \cdot d^{-1}$ 来衡量。选取煤气消耗量作为焦炉能耗指标。

炼焦生产过程单元优化控制层主要包括配煤过程优化控制、加热燃烧过程优化控制、集气管压力

解耦控制、焦炉作业计划与优化调度 4 个部分。配煤过程优化控制主要以各种不同的单种煤按一定的配比组合成配合煤,过程中配合煤质量(水分、灰分、硫分、挥发分、黏结性指数、反射率、胶质层指数、胶质层厚度、细度)是控制目标的影响因素之一;加热燃烧过程优化控制以火道温度的稳定为主要指标,火道温度是指焦炉各个燃烧室测温火道的平均值,过程中火道温度、烟道吸力、煤气流量、煤气压力等因素将对控制目标产生影响;集气管压力解耦控制将集气管压力稳定在某个值,从而保证集气过程的顺利进行,过程中集气管压力是控制目标的影响因素之一;焦炉作业计划与优化调度实际就是确定最合理的装煤-推焦-拦焦-熄焦时间,从而保证焦炉生产的稳顺进行,过程中结焦时间、每孔装煤量、出炉数将对控制目标产生影响。

由于配合煤质量包含的指标众多,采用主元分析方法对其进行降维处理,得到配合煤质量的 4 个主成分(配合煤质量第 1、2、3、4 主成分)。基于炼焦生产过程的实际经验并结合灰色关联分析方法,确定质量产量能耗预测模型的输入变量为:机侧火道温度 x_1 , 焦侧火道温度 x_2 , 集气管压力 x_3 , 结焦时间 x_4 , 配合煤质量第 1 主成分 x_5 , 配合煤质量第 2 主成分 x_6 , 配合煤质量第 3 主成分 x_7 , 配合煤质量第 4 主成分 x_8 , 每孔装煤量 x_9 , 出炉数 x_{10} , 机侧高炉煤气流量 x_{11} , 焦侧高炉煤气流量 x_{12} , 机侧高炉煤气压力 x_{13} , 焦侧高炉煤气压力 x_{14} , 机侧混合煤气流量 x_{15} , 焦侧混合煤气流量 x_{16} , 机侧烟道吸力 x_{17} , 焦侧烟道吸力 x_{18} 。

2 质量产量能耗预测模型

炼焦生产过程中焦炭质量、产量和焦炉能耗均为 8 h 检测一次,存在严重的滞后,因此需要建立质量产量能耗预测模型。预测模型作为参数优化的基础,模型的精度对于保证优化的有效性、可靠性具有重要的意义。炼焦生产过程参数多且耦合严重,所包含的信息有定性、定量、半定量等多种模态,采用传统建模方法难以准确地描述过程的性质。基本 BP 神经网络尽管有效,但在目标点附近收敛速度很慢,效率低,容易陷入局部极值,而导致学习失败。基于预测精度和收敛速度的考虑,本文采用了一种基于变学习率和样本批处理相结合的改进 BPNN 来建立质量产量能耗预测模型。

2.1 模型的建立

以焦炭质量预测模型为例, 确定神经网络模型的输入变量为 8 个: $x_1 \sim x_8$, 输出变量为 6 个: $Y_1 \sim Y_6$, 分别表示焦炭的水分、挥发分、灰分、硫分、抗碎强度、耐磨强度。采用 3 层的 BPNN 结构, 根据 Kolmogorov 定理和实际调试分析确定隐层节点数为 20。输入层到输出层的激励函数采用 tansig 函数, 隐层到输出层激励函数采用 purelin 函数。焦炭质量神经网络预测模型可以用式 (1) 表示

$$Y_k = \sum_{i=1}^{20} \omega_{k,i} \text{tansig} \left(\sum_{j=1}^8 \omega_{i,j} x_j + b_i \right) + \theta_k \quad (1)$$

式中 $\omega_{i,j}$ 为第 j 个输入变量到第 i 个隐层神经元的权值, b_i 为对应第 i 个隐层神经元的阈值, $\omega_{k,i}$ 为第 i 个隐层神经元到第 k 个输出变量的权值, θ_k 为对应第 k 个输出神经元的阈值, $\text{tansig}(\cdot)$ 表示非线性 sigmoid 激励函数, 即

$$\text{tansig}(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (2)$$

焦炭产量、焦炉能耗和过程参数之间也存在一定的关联度, 因此采用类似的神经网络方法对焦炭产量、焦炉能耗分别建立预测模型。模型采用相同的 3 层 BPNN 结构, 隐层结点数分别为 15 和 27。用非线性函数 $f(\cdot)$ 表示 BPNN 描述的输入输出之间的非线性关系, 焦炭产量、焦炉能耗神经网络预测模型可以描述为:

焦炭产量神经网络预测模型

$$Y_{\text{JC}} = f_{\text{JC}}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_9, x_{10}) \quad (3)$$

焦炉能耗神经网络预测模型

$$Y_{\text{JN}} = f_{\text{JN}}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}, x_{16}, x_{17}, x_{18}) \quad (4)$$

2.2 模型的验证

为了检验模型的有效性, 从实际生产过程中取 300 组数据, 分别对炼焦过程焦炭质量、产量及焦炉能耗预测模型进行实验验证。统计分析结果如表 1 所示。

由表 1 可知建立的模型具有较高的预测精度, 本文获得的预测模型可以满足工艺的要求。

实际的生产过程是不断变化的, 因此神经网络预测模型随过程变化进行样本更新, 采用排除异常和离群样本的原则将最新的样本加入到学习库中, 并将旧样本剔除, 从而保持样本数量的不变。神经网络的学习采用后台训练方式, 使模型随系统的运行保持较高的精度。因此, 采用改进的 BPNN 方

法建立的焦炭质量产量能耗预测模型是有效的。

表 1 焦炭质量产量能耗预测模型的验证结果
Table 1 Prediction results of coke quality-quantity and coke oven energy consumption model

Prediction parameter	Precision/%
moisture	84.5
volatile matter	85.2
ash	87.1
sulfur	84.8
crushing strength	83.4
abrasion strength	86.3
quantity	86.7
energy consumption	87.3

3 质量产量能耗集成优化控制

质量产量能耗集成优化控制思路: 采用权重系数可变的线性加权法将多目标优化问题转化为单目标优化问题, 采用乘子罚函数法将描述的多约束优化问题转化为一个无约束的优化问题, 采用聚类搜索的方法获得历史上对当前工况的优化参数样本, 作为一个初始最优解, 采用改进的 DE/best/2/bin 变异方式的差分进化算法进行优化。

3.1 优化控制模型

产量质量能耗的优化目标是根据当前工况求取最优的过程参数以保证质量达标、产量最高和能耗最小。

焦炭质量指标要求 (以 % 表示) 分为 I 级、II 级、III 级标准。

I 级焦炭质量指标要求如式 (5) 所示

$$3 < Y_1 < 6, 0 < Y_2 < 1.9, 0 < Y_3 \leq 12, \\ 0 < Y_4 \leq 0.6, 92 < Y_5 < 100, 0 < Y_6 \leq 7 \quad (5)$$

II 级焦炭质量指标要求如式 (6) 所示

$$3 < Y_1 < 6, 0 < Y_2 < 1.9, 12 < Y_3 \leq 13.5, \\ 0.6 < Y_4 \leq 0.8, 88 < Y_5 < 92, 7 < Y_6 \leq 8.5 \quad (6)$$

III 级焦炭质量指标要求如式 (7) 所示

$$3 < Y_1 < 6, 0 < Y_2 < 1.9, 13.5 < Y_3 \leq 15, \\ 0.8 < Y_4 \leq 1, 83 < Y_5 < 88, 8.5 < Y_6 \leq 10.5 \quad (7)$$

实际生产过程中以客户需求确定焦炭的质量指标。下面以 I 级焦炭质量指标为例来建立优化模型。

根据焦炭质量、产量和焦炉能耗的预测模型可以获得炼焦过程产量质量能耗优化目标函数

$$\min[f_1(x), f_2(x)]$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} 3 < Y_1 < 6, 0 < Y_2 < 1.9, 0 < Y_3 \leq 12, \\ 0 < Y_4 \leq 0.6, 92 < Y_5 < 100, 0 < Y_6 \leq 7 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $f_1(x) = C - f_{JC}(X)$, $f_2(x) = f_{JN}(X)$, X 为预测模型的输入变量, C 为一个足够大的正数, 可以保证 $C - f_{JC}(X)$ 为非负。

3.2 集成优化控制结构

炼焦过程质量产量能耗优化目标函数具有非线性、多约束、多输入多输出、多目标的特点, 为此本文采用融合模糊 C 均值聚类和改进差分进化算法的集成优化算法解决其优化问题, 优化控制结构如图 1 所示。

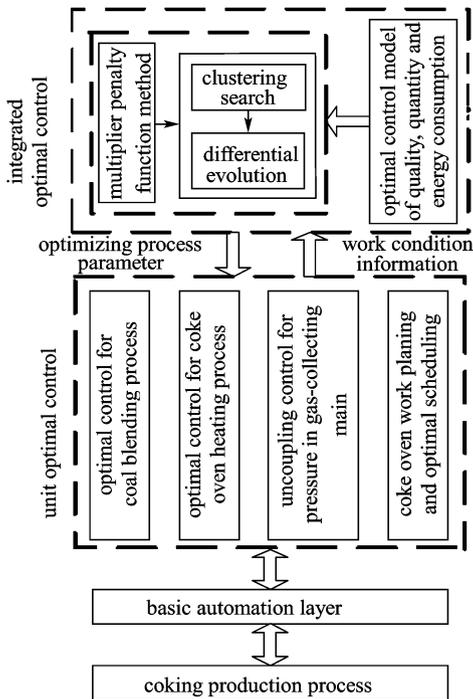


图 1 集成优化控制结构图

Fig. 1 Configuration of integrated optimal control

3.3 集成优化控制算法

由于两个目标函数的量纲不用, 采用式 (9) 对函数 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 进行归一化处理。

$$f'_i(x) = \frac{f_i(x)}{1 + f_i(x)} \quad (i = 1, 2) \quad (9)$$

按照线性加权和的方法, 采用权重系数变化法, 给各目标值赋予随机数权重, 然后线性相加计算个体的适应度为

$$f(x) = \sum_{i=1}^2 w_i f'_i(x) \quad (10)$$

式中 $w_i = h(i) / \sum_{k=1}^2 h(k)$, $h(i)$ 为一随机数, 其取值范围代表了决策者对各目标的重视程度。

采用乘子罚函数的思想, 可得到优化目标函数的乘子罚函数形式

$$\phi(x, \mu, c) = f(x) + \frac{1}{2c} \sum_{i=1}^{12} \{ [\max(0, \mu_i - cg_i(x))]^2 - \mu_i^2 \} \quad (11)$$

式中 μ 为乘子向量; c 为罚因子, c 的值依经验可取 4、6、8、10 等。式 (11) 的约束条件可以描述为

$$\begin{aligned} g_1(x) &= Y_1 - 3 > 0, & g_2(x) &= 6 - Y_1 > 0, \\ g_3(x) &= Y_2 > 0, & g_4(x) &= 1.9 - Y_2 > 0, \\ g_5(x) &= Y_3 > 0, & g_6(x) &= 12 - Y_3 > 0, \\ g_7(x) &= Y_4 > 0, & g_8(x) &= 0.6 - Y_4 > 0, \\ g_9(x) &= Y_5 - 92 > 0, & g_{10}(x) &= 100 - Y_5 > 0, \\ g_{11}(x) &= Y_6 > 0, & g_{12}(x) &= 7 - Y_6 > 0 \end{aligned} \quad (12)$$

乘子修正公式

$$\mu_i^{k+1} = \max\{0, \mu_i^k - cg_i(x^k)\} \quad (13)$$

结束准则公式

$$\left\{ \sum_{i=1}^{12} [\min(g_i(x^k), \mu_i^k / c)]^2 \right\}^{1/2} < \epsilon \quad (14)$$

采用基于模糊 C 均值聚类和差分进化算法的集成优化算法对上述非线性单目标无约束优化问题进行求解, 具体的计算步骤如下:

- (1) 设初始乘子 $\mu_i^1 = 1$, 罚因子 $c = 4$;
- (2) 建立炼焦过程优化操作数据库, 用于保存历史上典型工况下的优化过程参数;
- (3) 采用模糊 C 均值聚类方法对优化参数数据库中的样本进行聚类操作, 聚类后优化参数样本分为 15 大类, 第 i 类的类中心为 $Ceni$;
- (4) 计算现场数据样本与 15 个聚类中心的相似系数, 选取相似系数最大者作为搜索的子空间, 在子空间内遍历搜索, 计算现场数据样本与子空间中每个样本的相似系数, 对于相似系数大于 0.9 的子空间样本, 代入式 (11) 计算 $\phi(x, \mu, c)$ 的大小, 使 $\phi(x, \mu, c)$ 最小的样本则为聚类搜索的优化解 x^* ;
- (5) 设置相关参数, 初始化种群, 并将聚类搜索的优化解作为初始种群的最优解;
- (6) 采用改进的 DE/best/2/bin 变异方式的差分进化算法进行种群进化, 求取当前代种群中最优个体 x^k , 检查是否满足式 (14) 或到达算法的最大迭代次数, 如果是, 则进化过程结束, 取 $x^* = x^k$, 给出操作优化指导; 如果不满足, 则按式 (13) 修改乘子, 然后令 $k = k + 1$, 继续进行新一轮的种群进化。

表2 焦炭质量统计表
Table 2 Statistics of coke quality

Control	Qualification rate of moisture/%	Qualification rate of volatile matter/%	Qualification rate of ash/%	Qualification rate of sulfur/%	Qualification rate of crushing strength/%	Qualification rate of abrasion strength/%
unit optimal control	75.56	91.47	84.91	88.24	86.79	93.13
integrated optimal control	87.33	96.82	91.49	94.36	93.83	97.47
increment value	11.77	5.35	6.58	6.12	7.04	4.34

4 仿真结果

在实验室建立了焦炉生产过程仿真平台，将本文提出的集成优化控制方案在平台上进行了仿真实验，取得了较好的仿真结果。通过对生产过程集成优化控制仿真结果进行统计，质量指标的统计结果如表2所示，产量、能耗（单月）的控制效果分别如图2和图3所示。

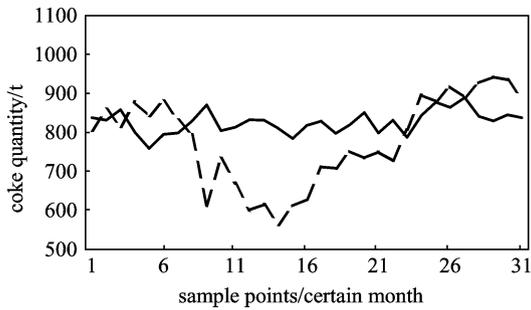


图2 焦炭产量优化控制运行结果

Fig. 2 Results of coke quantity optimization control
----- unit optimal control; ——— integrated optimal control

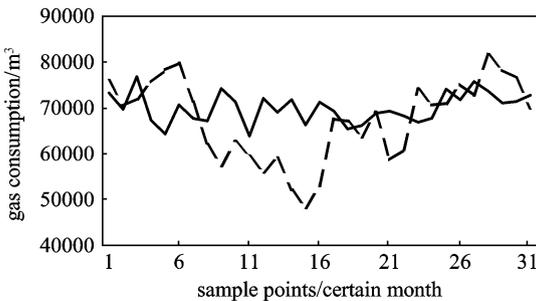


图3 煤气消耗量优化控制运行结果

Fig. 3 Results of gas consumption optimization control
----- unit optimal control; ——— integrated optimal control

当优化目标 $\phi(x, \mu, c)$ 小于某一设定值时，启用集成优化控制算法，其寻优有效率可以达到96.6%。可见，所提出的集成优化控制算法具有显著的工业有效性，较好地解决了具有非线性、多目

标、多约束特点的炼焦过程质量产量能耗优化控制问题。

5 结论

本文以炼焦生产过程的建模和优化控制为背景，采用主元分析、灰色关联分析、BP神经网络、模糊C均值聚类、差分进化算法等多种方法，提出了一种质量产量能耗集成优化控制方案，实现了炼焦过程生产指标的优化控制。仿真结果表明，预测模型具有较高的精度，集成优化控制减小了炼焦过程状态波动，达到高产、低耗、优质的目标。本文所提出的集成优化控制方案为复杂工业过程的建模和优化控制提供了一种有效可行的工程实现方法。

References

- [1] Yu Zhendong (于振东), Cai Chengyou (蔡承祐). Production Technique of Coke Oven (焦炉生产技术). Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2003
- [2] Ma Zhuwu (马竹梧). Automation Technology of Metallurgical Raw Material and Fuel Production (冶金原燃料生产自动化技术). Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005
- [3] Yang Chunhua (阳春华), Shen Deyao (沈德耀), Wu Min (吴敏), Liu Jianqin (刘健勤). Syntheses of qualitative and quantitative methods in a coal blend expert system for coke oven. *Acta Automatica Sinica* (自动化学报), 2000, 26 (2): 226-232
- [4] Yang Chunhua, Wu Min, Shen Deyao, Deconinck G. Hybrid intelligent control of gas collectors of coke ovens. *Control Engineering Practice*, 2001 (9): 725-733
- [5] Gao Junwei (高军伟), Ye Yangdong (叶阳东), Shi Tianyun (史天运), Jiang Qiuhua (蒋秋华), Jia Limin (贾利民). Research and application on coke oven heating intelligent control system. *Information and Control* (信息与控制), 2003, 32 (1): 86-91
- [6] Gao Xianwen (高宪文), Liu Hao (刘浩), Zhao Yaping (赵亚平). Application and research of the fuzzy compound control method in coke oven control system. *Control and*

- Decision* (控制与决策), 2005, **20** (4): 434-438
- [7] Gao Xianwen (高宪文), Zhao Yaping (赵亚平). Simulation of fuzzy adaptive PID control in coke oven process control. *Journal of Northeastern University* (东北大学学报), 2006, **27** (10): 1067-1070
- [8] Zhou Guoxiong (周国雄), Wu Min (吴敏), Cao Weihua (曹卫华), Lei Qi (雷琪). Variable structure control for gas collector pressure in coke oven. *Information and Control* (信息与控制), 2007, **36** (6): 732-738
- [9] Vicente L N. Local analysis of a new multipliers method. *European Journal of Operational Research*, 2002, **143**: 432-451
- [10] Gao Xue (高雪), Hu Hongfei (胡鸿飞), Fu Demin (傅德民). Design of shaped-beam for base station antenna in mobile system. *Journal of Microwaves* (微波学报), 2002, **18** (3): 39-42
- [11] Zhang Qiuhaohao (张秋豪), Sun Hanxu (孙汉旭). Coordinated manipulation and joint torque optimization of three branches robot. *Robot* (机器人), 2004, **26** (6): 502-505
- [12] Murata J, Ishibuchi H, Tanaka H. Multi-objective genetic algorithm and its application to flowshop scheduling. *Computers and Industrial Engineering*, 1996, **30** (4): 957-968
- [13] Ju Quanyong (鞠全勇), Zhu Jianying (朱剑英). Multi-objective flexible job shop scheduling of batch production. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (机械工程学报), 2007, **43** (8): 148-154
- [14] Du Yuxiao (杜玉晓), Wu Min (吴敏), Gui Weihua (桂卫华). Intelligent integrated optimization control techniques for the lead-zinc sintering process. *Control and Decision* (控制与决策), 2004, **19** (10): 1091-1096
- [15] Liu Bo (刘波), Wang Ling (王凌), Jin Yihui (金以慧). Advances in differential evolution. *Control and Decision* (控制与决策), 2007, **22** (7): 721-729
- [16] Ali M M. Differential evolution with preferential crossover. *European Journal of Operational Research*, 2007, **181**: 1137-1147