

## 高炉布料过程仿真与决策系统

张 军, 宋相满

(东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 针对高炉布料过程中人工决策无法得到稳定、满意的径向矿焦比值及炉况发生变化时不能及时做出准确的布料调整, 提出了基于操作优化的高炉布料仿真和决策系统. 以高炉多层布料料面对应的径向矿焦比值与满意值的偏差最小为目标函数, 建立高炉布料操作优化模型, 用差分进化算法对该模型求解. 本系统在某高炉实际运行后提高了炉况的稳定性, 满足了工业现场科学稳定地控制径向矿焦比等技术指标的要求, 同时在炉况变化时及时给出了布料调整方案. 在工业实际运行中验证了该系统的有效性.

**关 键 词:** 高炉布料; 仿真系统; 实际系统; 仿真实验; 操作优化

**中图分类号:** TP 182      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2015)10-1398-05

## Simulation and Decision-Making System in Burden Distribution of Blast Furnace

ZHANG Jun, SONG Xiang-man

( School of Information Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: ZHANG Jun, E-mail: wtuyss2000@126.com )

**Abstract:** For the difficulty to obtain a stable and satisfying ore to coke ratio indicator by manual decisions and unable to make the burden distribution adjustment timely and accurately, a simulation and decision-making system based on operation optimization was proposed in burden distribution. Taking the minimum deviation between the index value and the optimal value of practical burden surface as the objective function, an operation optimization model was built. A differential evolution algorithm was used to solve the proposed model. The system can improve the stability of the furnace condition after the actual operation of blast furnace, meet the requirements of scientific and stable control of ore to coke ratio and give the adjustment program of burden distribution in time when the furnace condition changes. The practical application results showed the effectiveness of the system.

**Key words:** burden distribution of blast furnace; simulation system; actual system; simulation experiment; operation optimization

高炉布料是控制高炉生产的必要手段, 操作人员依靠控制批重、料流阀开度、溜槽的旋转速度与倾角来调整炉内料面分布. 合理的料面分布可以使炉况稳定, 对铁水产量和高炉煤气分布产生影响<sup>[1]</sup>. 刘云彩提出了新的基于物理过程的布料方程<sup>[2]</sup>. 一些针对高炉炉料分布的物理模拟、数学模拟和数据驱动的建模方法<sup>[3-5]</sup>的相继提出进一步丰富了对高炉这一“黑箱”装置的认识, 也使得高炉炉料分布的模拟结果更加准确. 以往关于

钢铁生产管理的研究主要集中在通过设计有效算法解决生产中存在的管理问题<sup>[6-8]</sup>, 这些结果不能够解决人工决策布料所得到的料面达不到最优控制指标的要求, 以及炉况变化时不能及时做出准确的布料调整的问题. 为此, 本文提出了基于操作优化的布料仿真与决策系统, 在精确模拟实际布料结果的同时给出使炉况指标保持长期稳定的布料控制决策.

## 1 高炉布料仿真模型系统

本文提出的高炉布料生产的仿真与决策系统包括布料仿真模型系统和控制决策系统. 仿真系统要与实际系统尽可能契合, 就要求无论是物理规律和相应的研究对象必须与实际装置在一定的范围内相对统一, 具有可靠性、稳定性、操作性、实用性和功能的完整性. 模型的前提条件包括: 炉料在炉内以环状呈中心对称分布; 布料过程中料面不下降; 忽略矿石层与焦炭层混合时的超越现象.

在某  $1\ 800\ \text{m}^3$  高炉的布料过程中, 炉料主要历经以下几个主要环节: 料罐中的炉料经料流阀、Y 形管、中心喉管进入旋转溜槽; 离开溜槽, 在空区进行落体运动; 炉料堆积形成新的料面.

$$Y(X) = \begin{cases} \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}(X - X_1) + Y_1, & 0 = X_1 \leq X < X_2; \\ \frac{Y_3 - Y_2}{X_3 - X_2}(X - X_2) + Y_2, & X_2 \leq X < X_3; \\ \vdots & \vdots \\ \frac{Y_N - Y_{N-1}}{X_N - X_{N-1}}(X - X_{N-1}) + Y_{N-1}, & X_{N-1} \leq X \leq X_N = r. \end{cases} \quad (2)$$

高炉布料过程各控制变量为溜槽旋转速度  $\omega(t)$ 、料流阀开度  $D(t)$ 、溜槽与水平方向的倾角  $\alpha(t)$  和批重  $G$ , 已布紧邻料面为  $Y_j(X)$ . 当前布料料面函数  $Y(X)$  与高炉布料过程各控制变量的对应关系为

$$Y(X) = f(D(t), \omega(t), \alpha(t), G, Y_j(X)). \quad (3)$$

拟合炉喉部半径方向每个坐标点  $(X, Y)$  的实际下降速度:

$$v_d = -a_d \times X^2 + b_d \times X + c_d. \quad (4)$$

式中:  $a_d, b_d$  和  $c_d$  为下降系数;  $X$  为当前料面上的坐标点距炉喉中心的距. 取  $a_d = 0.000\ 062\ 857\ 1$ ,  $b_d = 0.000\ 277\ 143$ ,  $c_d = 0.002$ . 在炉喉与炉身交点水平面以上时, 径向下降速度:

$$v_{CD} = v_d. \quad (5)$$

在炉喉与炉身交点水平面以下时:

$$v_{CD} = (X_0^2 v_d) / [X_0 + (Y_0 - Y) \tan \gamma]^2. \quad (6)$$

式中:  $(X_0, Y_0)$  是炉喉与炉身交界点坐标;  $\gamma$  是炉身角. 料面下降后的布料料面坐标点为

$$X' = X + s_1, \quad (7)$$

$$Y_d(X') = Y(X) + s_v.$$

式中:  $(X, Y(X))$  是下降前的料面坐标点;  $s_1$  是每个坐标点的水平位移,  $s_v$  是竖直位移,  $(X', Y_d(X'))$  是下降后的料面坐标点. 料面下降前的

由炉料离开料罐的运动速度、出 Y 形管的运动速度、落入溜槽时速度和炉料离开溜槽时速度<sup>[2]</sup>得到炉料在料面上的落点坐标:

$$\left. \begin{aligned} x &= l_c \cdot \cos \alpha - b \cdot \sin \alpha + \sigma_{ux}, \\ y &= (g_c - g_h) - l_c \cdot \sin \alpha - b \cdot \cos \alpha + \sigma_{uy}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $l_c$  为溜槽有效长度;  $\alpha$  为溜槽与水平方向的倾角;  $b$  为溜槽倾动距;  $g_c$  为溜槽悬挂点标高;  $g_h$  为零势面标高;  $\sigma_{ux}, \sigma_{uy}$  为料流宽度引起的下落点偏移.

当前布料的料面函数  $Y(X)$  可以表示为  $N$  条线段组合而成的分段函数. 其中,  $\{(X_1, Y_1), \dots, (X_N, Y_N)\}$  是分段函数的端点坐标集合,  $X_1 = 0$  表示当前要布料的料面函数起始端点在炉中心线上,  $X_N = r$  表示当前要布料的料面函数末端点在炉墙上.

布料料面与下降后的布料料面之间的关系为

$$Y_d(X') = g(Y(X)). \quad (8)$$

## 2 控制决策系统

### 2.1 最优控制决策指标

选择高炉炉喉及炉身上部多层布料料面的径向矿焦比作为高炉布料的控制指标, 料层的透气性可以判断料层的排列状况, 而透气性的好坏可以用上部炉料中焦炭层和矿层的多少来衡量. 径向矿焦比能够直观地反映出沿半径方向各点的矿石与焦炭的比例, 对高炉透气性、炉况优劣和铁水产量也有直观的反应.

最近  $n$  批炉料的径向矿焦比为

$$T_j = \frac{\sum_{k=1}^n h_{oj}^k \rho_{oj}^k}{\sum_{k=1}^n h_{cj}^k \rho_{cj}^k}, \quad k = 1, \dots, n, j \in [0, r]. \quad (9)$$

式中:  $h_{oj}^k$  为第  $k$  层第  $j$  个点矿石厚度;  $h_{cj}^k$  为第  $k$  层第  $j$  个点焦炭厚度;  $\rho_{oj}^k$  为第  $k$  层第  $j$  个点矿石堆密度;  $\rho_{cj}^k$  为第  $k$  层第  $j$  个点焦炭堆密度;  $j$  等于  $r$  表示该点在炉墙上.

本文的目标径向矿焦比值的设定方式采用两种方式: 操作人员根据经验直接手动设置所需的

径向矿焦比曲线;采用数据解析的方法,将历史炉况良好的相关状态变量(热风压力、风温、炉顶压力、鼓风动能、透气指数、荒煤气流量、富氧量、全压差、平均顶温、十字测温各点值、料线高度)和对应的径向矿焦比曲线值放入精英数据库,然后计算当前的相关状态变量值与精英数据库中各数据值的均方误差和,从中选取最小误差所对应的样本,作为当前冶炼状态所对应的精英样本.该样本对应的径向矿焦比曲线即为当前状态最优径向矿焦比曲线.

## 2.2 控制决策模型的建立

以高炉布料过程中的  $n$  层布料料面对应的径向矿焦比值  $T_j$  与当前炉况下最优径向矿焦比指标值  $T'_j$  差异最小化为目标函数,以炉料批重  $G_k$ 、料流阀开度  $D_k(t)$ 、溜槽旋转速度  $\omega_k(t)$ 、溜槽与水平方向的倾角  $\alpha_k(t)$  为决策变量,建立高炉布料过程控制决策模型:

$$Y_k(X) = \begin{cases} \frac{Y_{k,2} - Y_{k,1}}{X_{k,2} - X_{k,1}}(X - X_{k,1}) + Y_{k,1}, & 0 = X_{k,1} \leq X < X_{k,2}; \\ \frac{Y_{k,3} - Y_{k,2}}{X_{k,3} - X_{k,2}}(X - X_{k,2}) + Y_{k,2}, & X_{k,2} \leq X < X_{k,3}; \\ \vdots & \vdots \\ \frac{Y_{k,N} - Y_{k,N-1}}{X_{k,N} - X_{k,N-1}}(X - X_{k,N-1}) + Y_{k,N-1}, & X_{k,N-1} \leq X \leq X_{k,N} = r. \end{cases} \quad (22)$$

$$\eta'_{\min} \leq \frac{Y_{k,n+1} - Y_{k,n}}{X_{k,n+1} - X_{k,n}} \leq \eta'_{\max}. \quad (23)$$

$$Y_{k,j}(X) = \begin{cases} \frac{Y_{k,j,2} - Y_{k,j,1}}{X_{k,j,2} - X_{k,j,1}}(X - X_{k,j,1}) + Y_{k,j,1}, & 0 = X_{k,j,1} \leq X < X_{k,j,2}; \\ \frac{Y_{k,j,3} - Y_{k,j,2}}{X_{k,j,3} - X_{k,j,2}}(X - X_{k,j,2}) + Y_{k,j,2}, & X_{k,j,2} \leq X < X_{k,j,3}; \\ \vdots & \vdots \\ \frac{Y_{k,j,N} - Y_{k,j,N-1}}{X_{k,j,N} - X_{k,j,N-1}}(X - X_{k,j,N-1}) + Y_{k,j,N-1}, & X_{k,j,N-1} \leq X \leq X_{k,j,N} = r. \end{cases} \quad (24)$$

$$(G_k - \rho_k \sum_{j=1}^n 2\pi \cdot x_j \cdot (Y'_k(x_j) - Y'_{k,j}(x_j)))^2 \leq \xi'. \quad (25)$$

式中:  $T'_j$  为求出的最优指标;  $h_{\alpha j}^k$  为第  $k$  层第  $j$  个点矿石厚度;  $h_{c j}^k$  为第  $k$  层第  $j$  个点焦炭厚度;  $\rho_{o j}^k$  为第  $k$  层第  $j$  个点矿石堆密度;  $\rho_{c j}^k$  为第  $k$  层第  $j$  个点焦炭堆密度;  $j$  等于  $r$  表示该点在炉墙上;  $Y_k(X)$  为第  $k$  层布料料面函数;  $Y_{k,j}(X)$  为第  $k$  层布料基料面函数;  $Y_{d,k}(X')$  为完成  $n$  层布料后第  $k$  层料面所在的料面函数(下降后第  $k$  层料面的料面函数);  $\lambda$  在非正常布料时取值为零;  $\xi$  和  $\zeta$  为极小的正实数;  $\eta'$  为料面函数的斜率.

## 2.3 求解方法

本文所提出的控制决策模型是非线性优化模

$$\min \sum_{j=0}^n (T'_j - T_j)^2, \quad (10)$$

$$\text{s. t. } D_{\min} \leq D_k \leq D_{\max}, \quad (11)$$

$$\alpha_{\min} \leq \alpha_k \leq \alpha_{\max}, \quad (12)$$

$$\omega_{\min} \leq \omega_k \leq \omega_{\max}, \quad (13)$$

$$\lambda G_{\min} \leq G_k \leq G_{\max}. \quad (14)$$

$$Y_k(X) = f(D_k(t), \omega_k(t), \alpha_k(t), G_k, Y_{k,j}(X)). \quad (15)$$

$$Y_{d,k}(X') = g(Y_k(X)). \quad (16)$$

$$T_j = \frac{\sum_{k=1}^n h_{oj}^k \rho_{oj}^k}{\sum_{k=1}^n h_{cj}^k \rho_{cj}^k}, k = 1, \dots, n, j \in [0, r]. \quad (17)$$

$$h_j^k = Y_{d,k}(x_j) - Y_{d,k-1}(x_j). \quad (18)$$

$$\lambda h_{\min} \leq h_j^k \leq h_{\max}. \quad (19)$$

$$(h_{j+1}^k - h_j^k)^2 + (Y_{d,k,j+1} - Y_{d,k,j})^2 \leq \xi. \quad (20)$$

$$(h_j^k - h_j^{k+2})^2 \leq \zeta. \quad (21)$$

型,带有多峰的特点,并且约束众多.差分进化(differential evolutionary, DE)算法<sup>[9]</sup>简洁、容易执行,且在多峰问题<sup>[10]</sup>上有较好的效果,所以,针对模型的特点,设计了差分进化算法求解高炉布料过程控制决策模型.为了增加差分算法种群和解的多样性,引入了分散搜索<sup>[11]</sup>(scatter search algorithm, SS)策略,算法流程如图 1 所示. DE 算法的解为各控制变量组成的向量  $X' = [D_k(t), \omega_k(t), \alpha_k(t), G_k]$  (第  $k$  层布料).

## 2.4 实验结果

分别用改进的差分进化算法、差分算法和分

散搜索方法对本文模型求解,所有算法采用 C++ 编码. 所有计算实验在一台 CPU 主频为 3.10 GHz,操作系统为 WINXP,内存为 2.99 GB RAM 的双核计算机上进行. 比较算法中,设定 $n=8$ ,种群规模 $n_p=200$ ,变异因子 $F=0.7$ ,交叉因子 $C_r=0.4$ ,最大迭代次数 $g'_{\max}=100$ . 根据实际的炉况条件进行计算,所得目标矿焦比曲线如图 2 所示,计算结果如表 1 所示. 所得布料料面如图 3 所示. 结果表明了所提算法的有效性.

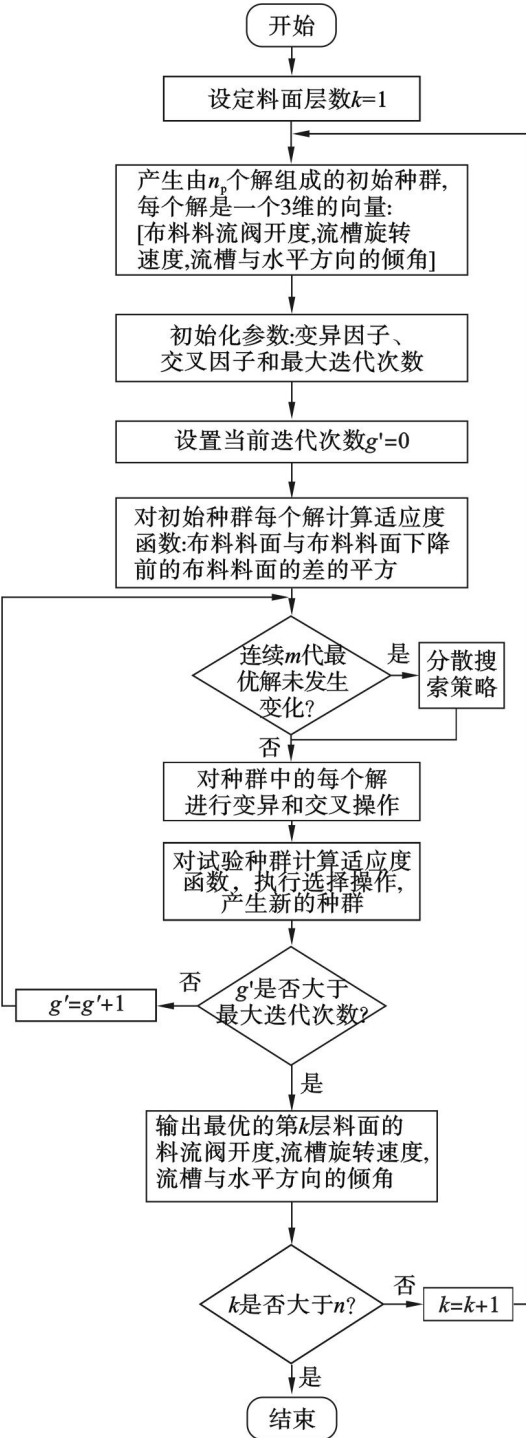


图 1 差分进化算法求解流程图  
Fig. 1 Flowchart of differential evolution algorithm

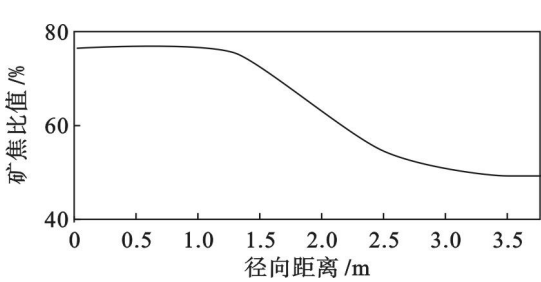


图 2 目标径向矿焦比曲线图  
Fig. 2 Radial distribution of ore to coke ratio

表 1 不同算法的比较  
Table 1 Comparison of different algorithms

层数 <i>n</i>	目标函数值			计算时间/s		
	SS	DE	DE-SS	SS	DE	DE-SS
1	<b>30.7</b>	<b>30.7</b>	<b>30.7</b>	131	116	<b>112</b>
2	80.9	<b>77.3</b>	<b>77.3</b>	<b>123</b>	130	<b>123</b>
3	<b>37.3</b>	<b>33.3</b>	<b>33.3</b>	160	132	<b>131</b>
4	17.3	<b>13.6</b>	<b>13.6</b>	157	<b>141</b>	150
5	20.7	20.7	<b>19.7</b>	170	<b>152</b>	161
6	14.6	10.9	<b>10.3</b>	168	<b>154</b>	164
7	62.4	51.1	<b>51.1</b>	217	<b>173</b>	176
8	60	51.8	<b>51.3</b>	193	<b>168</b>	171

注:黑体字为最优值.

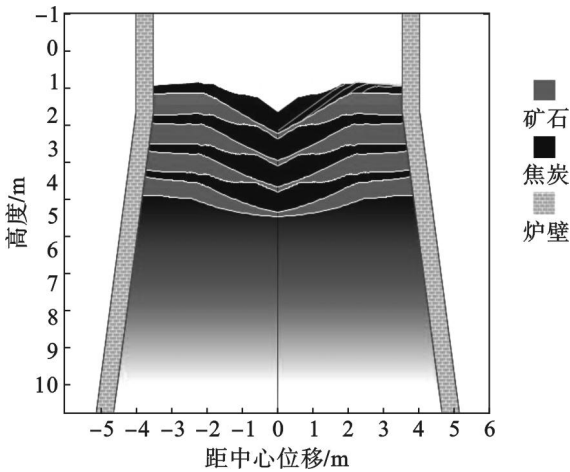


图 3 得到的  $n$  层布料料面  
Fig. 3  $n$  layers burden surface

计算得到某层布焦炭时的各个决策变量:流槽水平旋转速度 $\omega_k(t)=1.7\text{ rad/s}$ 、料流阀开度 $D_k(t)=24$ 、批重 $G_k$ 为 $9.1575\text{ t}$ ,图 4 为溜槽倾角随时间的变化曲线. 在不同高炉布料操作情况下,多次进行实验. 实际生产中的布料料面与系统算法结果对比,平均偏差不超过 3%,最大偏差不超过 6.5%,如图 5 所示,可以达到高炉布料生产的要求.



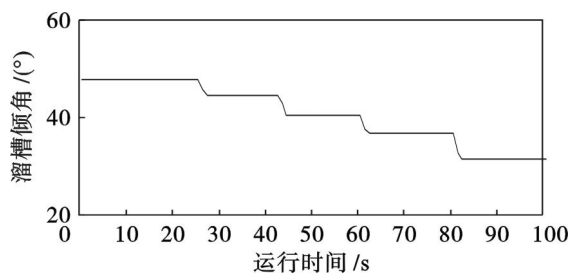


图 4 溜槽倾角随时间的变化曲线

Fig. 4 Effect of time on chute inclination

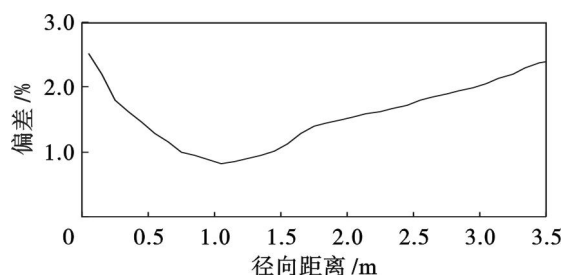


图 5 计算结果与实际系统的偏差

Fig. 5 Deviation between computing value and actual value

### 3 结 语

本文针对高炉布料生产这一复杂的“黑箱”系统的控制问题,设计开发了相应的仿真和控制决策系统.以高炉布料过程中的多层布料料面对应的指标值与最优值差异最小化为决策目标,确定炉料批重、料流阀开度、溜槽旋转速度和倾角的设定值,直接指导高炉实际的布料操作.系统决策所得到的料面对应的控制指标值与最优值的偏差不大于3%,能够及时做出准确的布料调整策略,不但实现了高炉布料系统的可视化操作,使得指标更加稳定,而且实现了布料系统的闭环控制.

本文所提出的系统还需要应用在其他规格的高炉,进行不断实验和修正.本文中优化的指标是

径向矿焦比,为了使高炉更加适应各种因素的变化,还需要增加新的指标,开发多指标优化模型.

#### 参考文献:

- [1] Nakano K, Sunahara K, Inada T. Advanced supporting system for burden distribution control at blast furnace top [J]. *The Iron and Steel Institute of Japan*, 2010, 50(7): 994-999.
- [2] 刘云彩. 高炉布料规律[M]. 北京:冶金工业出版社, 2005: 25-40.  
(Liu Yun-cai. Stock distribution in blast furnace [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 25-40.)
- [3] Park J I, Jung H J, Jo M K, et al. Mathematical modeling of the burden distribution in the blast furnace shaft [J]. *Metals and Materials International*, 2011, 17(3): 485-496.
- [4] Xu J, Wu S L, Kou M Y, et al. Circumferential burden distribution behaviors at bell-less top blast furnace with parallel type hoppers [J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2011, 35(3): 1439-1455.
- [5] Yu Y W, Henrik S. Experimental and DEM study of segregation of ternary size particles in a blast furnace top bunker model [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(18): 5237-5250.
- [6] Tang L X, Wang G S, Liu J Y. A branch-and-price algorithm to solve the molten iron allocation problem [J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(10): 3001-3015.
- [7] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in Shanghai Baoshan Iron & Steel Complex [J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 124(2): 267-282.
- [8] Tang L X, Liu J Y, Rong A Y, et al. A mathematical programming model for scheduling steelmaking-continuous casting production [J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 120(2): 423-435.
- [9] Storn R, Price K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. *Journal of Global Optimization*, 1997, 11(4): 341-359.
- [10] Ronkkonen J, Kukkonen S, Price K V. Real-parameter optimization with differential evolution [C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation. Edinburgh, 2005: 506-513.
- [11] Glover F. Heuristics for integer programming using surrogate constraints [J]. *Decision Sciences*, 1977, 8(1): 156-166.