

文章编号:1000-582X(2009)04-376-05

# 高炉透气性指数智能预测模型

梁 栋,白晨光,温良英,王 凤,吕学伟,张生富

(重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400030)

**摘 要:**高炉透气性指数是生产中最重要监控参量之一,对透气性指数未来趋势的把握,于高炉操作者而言至关重要。通过支持向量机结合小波分析建立一个高炉透气性指数的预测模型,将历史四点透气性指数通过7层小波分解,使其波动范围变窄,结合相关的操作参数针对分解后的8个小波分量通过支持向量机建立8个预测子模型,最后通过预测分量的重构得到预测值。模型四点预测误差较小,并能满足高炉短期调节时限的要求。

**关键字:**高炉;透气性指数;小波分析;支持向量机

中图分类号:TF543

文献标志码:A

## Intellectual prediction of a permeability index for blast furnaces

LIANG Dong, BAI Chen-guang, WEN Liang-yin, WANG Feng, LV Xue-wei, ZHANG Sheng-fu

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

**Abstract:** The permeability index for blast furnaces is an important monitoring parameter in their operation. Proper trend prediction of the permeability index is important for good operation. Support vector machines (SVM) combined with wavelet analysis are adopted to build a forecasting model. Four historic values of a permeability index are analyzed by a wavelet analysis via seven levels. Based on eight wavelet analyzed values and combined with operating parameters, eight sub-models are built using the least square support vector machines method. The prediction components are reconstructed to obtain a forecast. The details of modeling, validation and result analyses are presented.

**Key words:** blast furnace; permeability index; wavelet analyze; support vector machines

高炉操作者对炉况的判断主要基于高炉的热状态和顺行状态。二者相互关联与影响,作用的结果反映在高炉的顺行上。对于顺行状态而言,透气性指数又最为敏感。透气性指数的理论依据来源于厄根方程,它表征着高炉透气性的变化,生产中多以风量与压差的商或其倒数来定义<sup>[1]</sup>。有经验的高炉操作者对于高炉顺行状态的把握主要依靠透气性指数的变化。对高炉透气性指数的准确预测,对于高炉操作尤为重要。然而,高炉冶炼过程中发生的化学

反应较复杂,数据众多噪声分布不明确,参量变化范围大,参量间影响多呈现复杂非线性关系,这都将影响预测的准确性。目前,国内外关于高炉透气性指数的预测模型尚未见报道。

基于上述困难,笔者尝试通过小波分析方法结合支持向量机的技术路线来进行高炉透气性指数的预测。结合以上2种技术的优势可以很好的实现透气性指数的预测。

收稿日期:2008-12-27

基金项目:国家自然科学基金和上海宝钢集团公司联合资助(50374085)

作者简介:梁栋(1979-),男,重庆大学博士研究生,主要从事铁区工艺预测及优化研究;

白晨光(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail) bguang@cqu.edu.cn。

## 1 建模方法介绍

支持向量机(SVM):支持向量机以其基于少数数据的建模精准性和优良的推广能力而著称。其实质是将低维不可线性划分的空间通过核运算转至高维空间最终线性可分。其通过结构化风险最小的原理来保证优良的泛化性能<sup>[2]</sup>。目前模式识别、预测回归、控制等领域得到了广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。

文中将采用最小二乘支持向量机(LS-SVM)对高炉透气性指数进行预测建模。

小波分析<sup>[5-6]</sup>:小波变换是一种信号的时间-频率分析方法,通过母波函数尺度和频率的变化可以将信号分解成不同频率和尺度的子信号。文中应用了离散小波多尺度分解技术对透气性指数进行分解,根据 Mallat 算法信号通过高频和低频滤波器分解为高频和低频两种信号,通常高频信号(Di)称为细节部分,其中含有信号中的噪声,低频部分(Ai)称为近似部分。对低频的部分继续多尺度分解,信号的变化趋势愈加明显,不同尺度下信号的波动变得缓慢,使得原本变化范围很大的时间序列预测变得更为容易(如图1所示)。

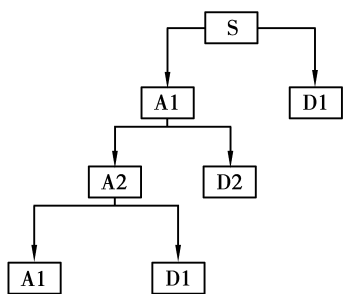


图1 多尺度小波分解示意图

将不同尺度的信号重构即可得到原始信号,

$$S = A_i + D_i + D_{i-1} \dots + D_1. \quad (1)$$

## 2 建模参量的选择

影响高炉透气性的因素众多,其中以高炉的热制度、送风制度和料顺行状况为主。尽管实时高炉透气性指数直接由风量和压差相除得到,然而高炉众多操作参量相互影响,生产中有经验的操作者对于未来透气性指数的趋势预测并不仅仅着眼于热风压力、风量、顶压。通常还会结合其它操作参量来共同进行判断。

其中喷煤量变化将直接影响煤气量并且会造成高炉下部的热波动,进而会对高炉透气性指数造成

影响。未燃煤粉的存在对于透气性也具有一定的影响,目前尚未有一种模型可以精确的实时的描述未燃煤粉的量,并且未燃煤粉的波动对透气性指数的影响将会直接表现在风量、喷煤以及压差和顶温的数值的变化中,因此模型中并没有直接引入未燃煤粉的量;

炉顶温度在风温波动不大的情况下可间接反映高炉整体的热交换状态。

因此,在模型输入参数中增加了喷煤量以及炉顶4点温度的均值。

此外,透气性指数数据是一维非线性时间序列,生产中通过前期的数据趋势可以对后续的趋势进行判断与预测,因此在建模中将预测点前的历史透气性指数也作为输入量。通过对透指时序数据的相关性分析(如表1),可以看出*t*时间点的数据与前面各时间点的数据相关性随着时间窗的增长而递减,选择其中相关性较好的前4个时刻数据的小波分解分量作为输入,对后续4点的小波分量来进行预测(根据多次实验结果相关性低于0.6,预测效果较差),最后根据公式(1)将信号重构得到透气性指数的预测值。

表1 *t*时刻透气性指数与时序数据相关性

时刻	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$	$t_8$
相关性	0.89	0.82	0.77	0.70	0.59	0.56	0.53	0.47

## 3 模型建立

### 3.1 数据获取

数据来源于某高炉的生产数据库,包括透气性指数、热风压力、喷煤量、风量、顶压、炉顶4点温度(取平均值作为一个输入)。数据采集频率为个/秒,采集时长共5 005 min。

生产中过为频繁的预测,意义是不大的,将原始数据每5 min采集1次,共得到1001组数据。将其中的504组用于模型训练,剩下的用于模型检测。其中透气性指数见图2。由图2可知数据变化范围大,分布杂乱,规律不明显。

### 3.2 透气性指数的处理

为了便于预测,对透气性指数的时序数据进行了小波分解,小波函数采用常见的 Daubechies 小波函数组中的 db9,程序使用 MATLAB 小波工具箱中的函数编写。

随着小波分解层数的增加,信号趋势项愈加平

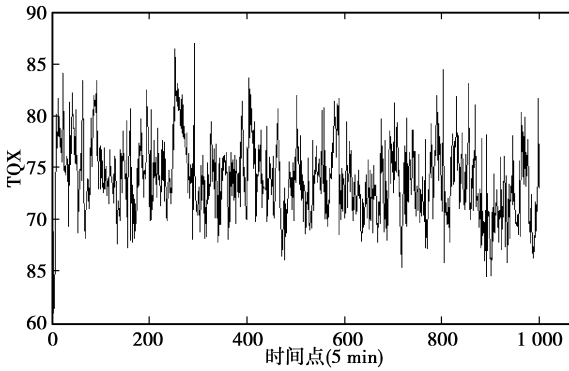


图 2 透气性指数时序数据

缓,通常分解层数的选择以实际效果来决定。根据经验,当近似信号的标准差( $\text{std}(A_i)$ )小于实际信号标准差( $\text{std}(S)$ )的  $1/3$  时即可停止分解。通过试验,选择分解 7 层。

这是因为

$$\text{std}(A_7)/\text{std}(s) = 0.2117 < 0.3, \quad (2)$$

7 层分解情况如图 3,从中可以看出通过分解后,随着层数增加信号愈加平缓,原始信号的波动范围为 20,至第 7 层的近似信号( $A_7$ )波动范围仅为 4,这将有助于预测的精准性。

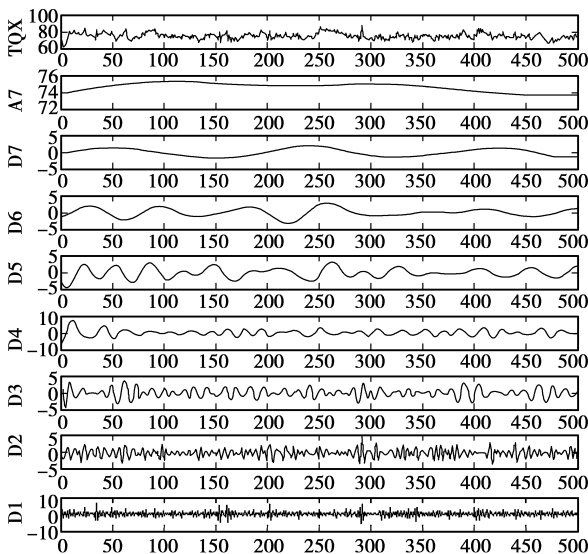


图 3 透气性指数的 7 层小波分解图

### 3.3 训练模型

通过支持向量机分别对透气性指数的 8 个小波分解量( $D1 \sim D7, A7$ )建立预测子模型,其框架如图 4 所示。左端为输入参量,右端为输出。其中  $U_i(t-j)$  代表透气性指数的第  $i$  层小波分解量( $D1 \sim D7, A7$ )在  $(t-j)$  时刻的值。输入参量包括  $t$  时刻的热风压

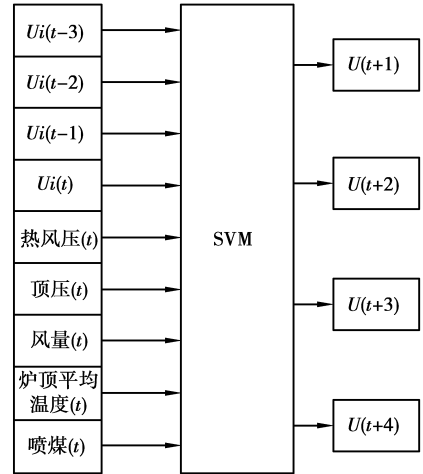


图 4 子预测模型框架图

力、风量、顶压和喷煤量,炉顶四点平均温度以及  $t-3$  时刻~ $t$  时刻的透气性指数小波分量,模型的输出端为  $t+1$  时刻~ $t+4$  时刻四步透气性指数的小波分量。

支持向量机核函数选择 RBF 核,其中参数  $\sigma^2 = 0.2, \gamma = 10$ ,由于输入含 4 个时间延迟,因此 504 组训练数据集组为 500 组输入输出数据对建立模型。

模型建好后,将建模输入集输入各子模型,将预测分量以公式 1) 重构得到透气性的后四步预测值(即  $t+1 \sim t+4$  时刻的值),预测值与真实值的对比见图 5。

500 组数据最大相对误差及平均相对误差见表 2。分析误差可以看出,四点预测误差差别不大,精准度都很好,从图中也可以看出,真实值与预测值基本吻合,这说明模型对于训练数据的拟合较好。

表 2 训练数据预测值与真实值相对误差 %

	一步预测	二步预测	三步预测	四步预测
个点最大相对误差	1.36	1.37	1.37	1.47
平均相对误差	0.33	0.36	0.37	0.39

### 3.4 模型验证

将验证数据带入模型,后四步预测值与真实值的对比见图 6,误差分析见表 3。从图表中可以发现,四步预测平均误差最大达到 2.42%,一步预测误差最低仅为 0.72%,这样的结果是符合相关性分析的。四步预测点对应着当前时间 20 min 后的透气性指数预测,该误差值对于高炉预测而言是符合

精度要求的。从图中也可以看出,尽管有误差的存在,第四步预测点也能较好的吻合真实值。由此可

以推断,基于小波分解与支持向量机对高炉透气性指数进行预测是可行的。

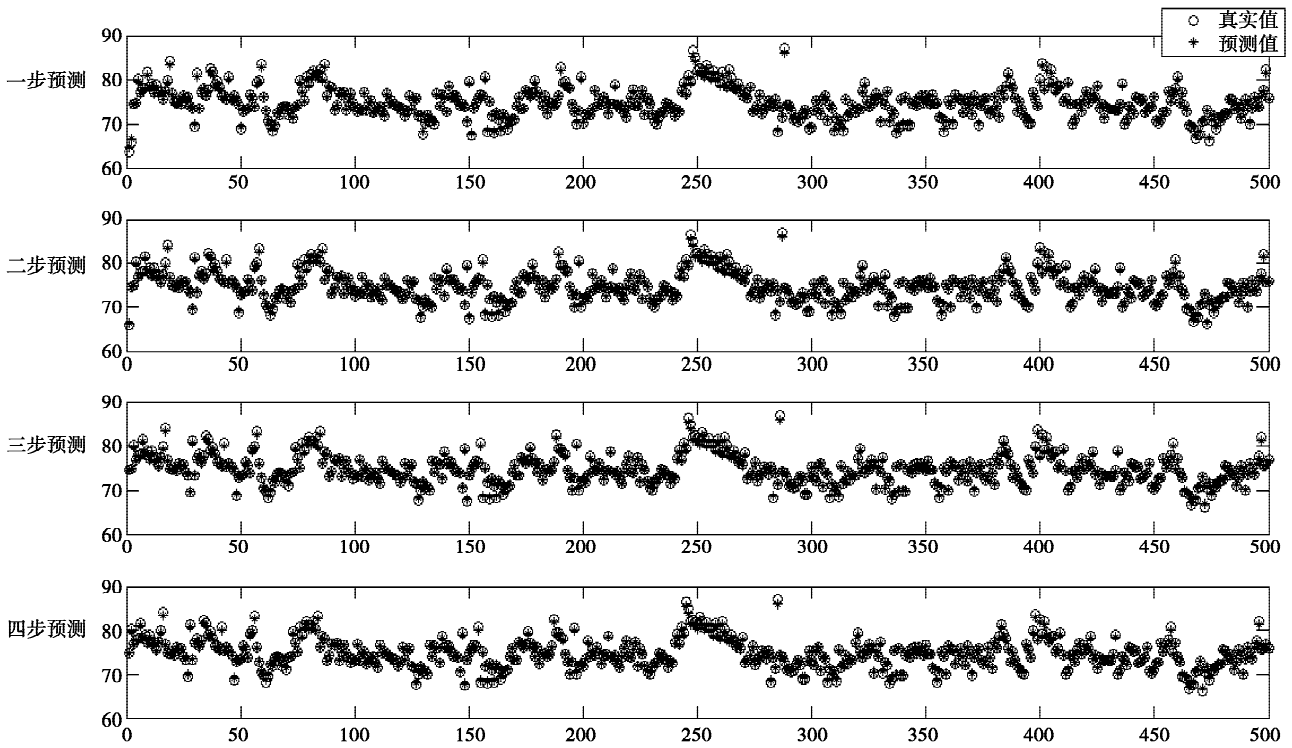


图 5 训练数据代入模型预测值与真实值比较

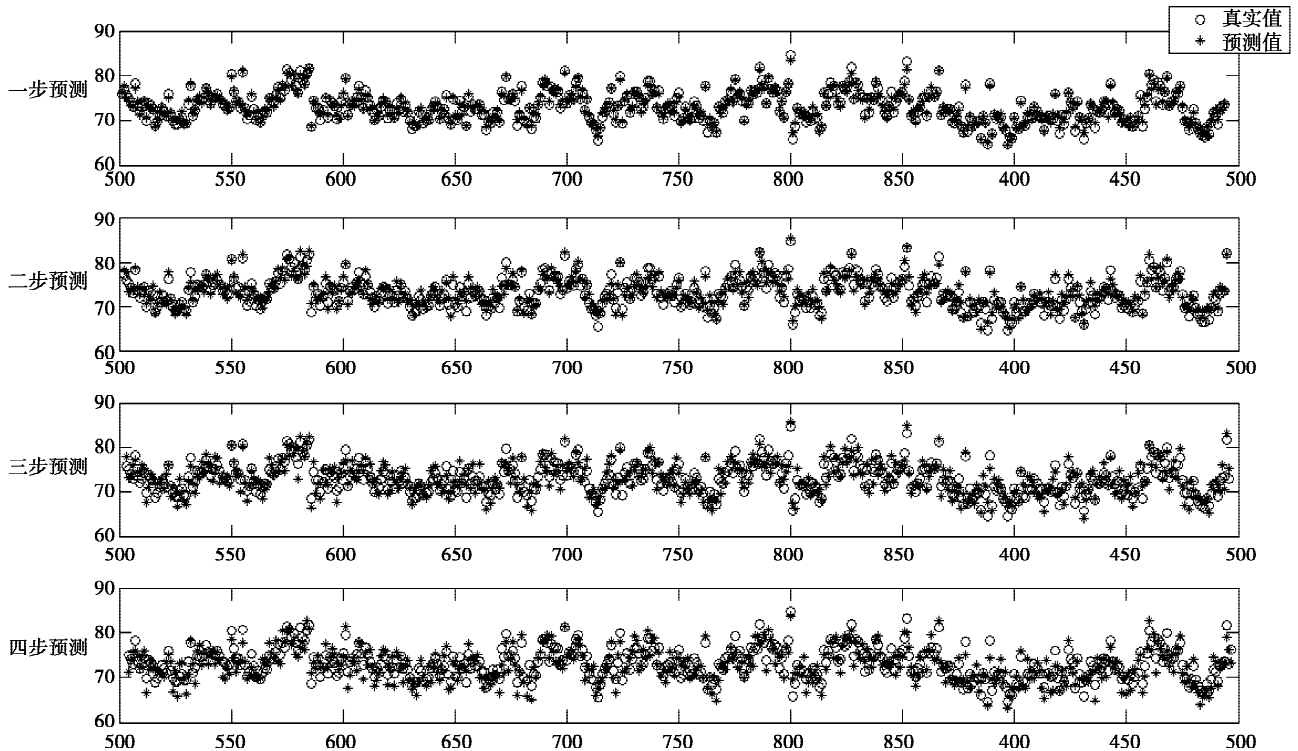


图 6 验证数据代入模型预测值与真实值的比较

表3 验证数据预测值与真实值相对误差 %

	一步预测	两步预测	三步预测	四步预测
个点最大相对误差	1.46	2.96	3.92	4.54
平均相对误差	0.72	1.40	2.12	2.42

## 4 结 论

笔者尝试以小波分析结合支持向量对高炉生产中的透气性指数进行预测。其中将历史四点透气性指数通过7层小波分解,使其波动范围变窄,而后结合相关的操作参数针对分解后的8个小波分量通过LS-SVM建立8个预测子模型,最后通过预测分量的重构得到预测值。

通过误差分析可以看出:

1) 预测误差随着预测步长的增加逐步增加,一步预测点的相对误差最低,四步预测点的相对误差最大;

2) 最大平均相对误差,四步预测误差为2.42%,即提前20 min预测透气性指数的值与真实值间最高仅有2.42%的波动,对于高炉生产而言是可以接受的;能提前20 min对高炉透指数值做出预测,也可满足高炉短期调节时限的要求。

因此,以小波分析结合支持向量的技术路线对高炉生产中的透气性指数进行预测建模是可行的,模型预测误差较小,对于高炉操作者具有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
- [2] NELLO CRISTIANINI, JOHN SHAWE-TAYLOR. An Introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [3] KEMAL POLAT, SALIH GüNEŞ, AHMET ARSLAN. A cascade learning system for classification of diabetes disease: generalized discriminant analysis and least square support vector machine [J]. Expert Systems with Applications 2008, 34(1):482-487.
- [4] KITTLER KIM, KIM TK, KITTLER J. Locally linear discriminant analysis for multimodally distributed classes for face recognition with a single model image[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(3):318-327.
- [5] 周伟. MATLAB小波分析高级技术[M]. 西安:西安电

子科技大学出版社,2006.

- [6] STANISLAW OSOWSKI, KONRAD GARANTY. Forecasting of the daily meteorological pollution using wavelets and support vector machine [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2006(10):1-11.
- [7] 曲飞, 吴敏, 曹卫华, 等. 基于支持向量机的高炉炉况诊断方法[J]. 钢铁, 2007(10):17-19.  
QU FEI, WU MIN, CAO WEI-HUA, et al. BF status diagnosis approach based on SVM [J]. Iron & Steel, 2007(10):17-19.
- [8] 渐令, 刘祥官. 支持向量机在铁水硅含量预报中的应用[J]. 冶金自动化, 2007(5):33-36.  
JIAN LING, LIU XIANG-GUAN. Application of SVM to prediction of silicon content in hot metal [J]. Metallurgical Industry Automation, 2007(5):33-36.
- [9] 熊志化, 黄国宏, 邵惠鹤. 基于高斯过程和支持向量机的软测量建模比较及应用研究[J]. 信息与控制, 2004(12):754-758.  
XIONG ZHI-HUA, HUANG GUO-HONG, SHAO HUI-HE. Comparison and application research on soft sensor modeling based on gaussian processes and support vector machines [J]. Information and Control, 2004(12):754-758.
- [10] 徐万仁, 张龙来, 张永忠. 高小块焦比操作对高炉透气性和煤气流分布的影响[J]. 炼铁, 2005(10):27-30.  
XU WAN-REN, ZHANG LONG-LAI, ZHANG YONG-ZHONG. Influence of operation at high coke nut ratio to permeability and gas flow distribution [J]. Iron Making, 2005, 24(5):30.
- [11] 徐万仁, 朱仁良, 张龙来. 高炉高煤比操作的实践[J]. 钢铁, 2005(9):9-12.  
XU WAN-REN, ZHU REN-LIANG, ZHANG LONG-LAI. Practice and analysis on high pulverized coal Injection rate operation of blast furnace [J]. Iron and Steel, 2005(9):9-12.
- [12] 陈桂英. 焦炭热反应性能对高炉透气性的影响[J]. 能源研究与利用, 2005(4):41-43.  
CHEN GUI-YING. The influence of the thermal reactive capability of coke on the venting quantity of BF [J]. Energy Research and Utilization, 2005(4):41-43.
- [13] 何江平, 文俊浩, 邓恬洁. 基于支持向量机的图像识别 [J]. 重庆大学学报:自然科学版, 2006(1):58-60.  
HE JIANG-PING, WEN JUN-HAO, DENG TIAN-JIE. Image recognising based on support vector machine [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2006(1):58-60.

- Metallurgical and Materials Transactions, 1997, 28B(2): 333-343.
- [7] WANG G X, LIU D Y, LITSTER J D, et al. Experimental and numerical simulation of discrete liquid flow in a packed bed [J]. Chemical Engineering Science, 1997, 52(21-22): 4013-4019.
- [8] LIU D Y, WANG G X, LITSTER J D. Insaturated liquid percolation flow through nonwetted packed beds [J]. AIChE Journal, 2002, 48(5): 953-962.
- [9] OHNO Y, SCHNEIDER M. Effect of horizontal gas flow on liquid dropping flow in two-dimensional packed bed [J]. Tetsu-to-Hagané, 1988, 74(10): 35-42.
- [10] MATSU-URA M, OHNO Y. Modeling of gas and liquid flow in two dimensional packed bed and analysis of dropping zone in blast furnace [J]. Tetsu-to-Hagané, 1994, 80(12): 14-19.
- [11] WANG J, KAKAHASHI R, YAGI J. Simulation model of the gas-liquid flows in the packed bed [J]. Tetsu-to-Hagané, 1991, 77(10): 47-54.
- [12] ETO Y, TAKEDA K, MIYAGAWA S, et al. Experiments and simulation of the liquid flow in the dropping zone of a blast furnace [J]. ISIJ International, 1993, 33(6): 681-686.
- [13] LIU D Y, WANG G X, LITSTER J D. Experimental investigation of liquid flow shift due to gas cross flow in non-wetted packed beds [J]. ISIJ International, 2001, 41(1): 10-17.
- [14] CHUANG H C, KUO J H, HUANG C C, et al. Multi-phase flow simulations in direct iron ore smelting reduction process [J]. ISIJ International, 2006, 46(8): 1158-1164.
- [15] HUANG C E, DU S W, CHENG W T. Numerical investigation on hot metal flow in blast furnace hearth through CFD [J]. ISIJ International, 2008, 48(9): 1182-1187.
- [16] CHU MAN-SHENG, NOGAMI H, YAGI J. Numerical analysis on blast furnace performance under operation with top gas recycling and carbon composite agglomerates charging [J]. ISIJ International, 2004, 44(12): 2159-2167.
- [17] GUO B Y, MALDONADO D, ZULLI P, et al. CFD modelling of liquid metal flow and heat transfer in blast furnace hearth [J]. 2008, 48(12): 1676-1685.

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第380页)

- [14] 杨强,吴中福,余萍. 一种新型支持向量机[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2005(2):81-84.  
YANG QIANG, WU ZHONG-FU, YU PING. A sort of new SVM[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005(2), 81-84.

- [15] 朱凌云,曹长修. 基于支持向量机的缺陷识别方法[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2002(6):42-45.  
ZHU LING-YUN, CAO CHANG-XIU. A novel method based on support vector machine for defect identification[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2002(6):42-45.

(编辑 陈移峰)