

# 基于支持向量回归的300MW电站锅炉再热汽温建模

黄景涛<sup>1</sup>, 马龙华<sup>1</sup>, 茅建波<sup>2</sup>, 钱积新<sup>1</sup>

(1. 浙江大学工业控制技术国家重点实验室, 浙江省 杭州市 310027;

2. 浙江省电力试验研究所, 浙江省 杭州市 310014)

## Modeling Research of the Reheat Steam Temperature of 300 MW Boiler Based on Support Vector Regression

HUANG Jing-tao<sup>1</sup>, MA Long-hua<sup>1</sup>, MAO Jian-bo<sup>2</sup>, QIAN Ji-xin<sup>1</sup>

(1. National Laboratory of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China;

2. Zhejiang Electric Power Test & Research Institute, Hangzhou 310014, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** To solve the problem of reheat steam temperature (RST) abnormal of the 300MW power station boiler unit, a method based on support vector regression (SVR) was presented to model RST. Based on the data sampled on spot, RST was analyzed using support vector regression method. RST model is based on the statistical characteristics of the operating parameters and can reflect the potential relationship between RST and the operating parameters. For the units considered here, the RST is low and the temperature of reheater tube wall is high, tilt angles and desuppreheater spray, etc. were taken as the tuning parameters and as the features of SVR model. The prediction results on test data with SVR-RST show high regression coefficient with low complexity, which means SVR-RST model has excellent robustness, which is important to further optimize the operating parameters for higher efficiency and security.

**KEY WORDS:** power station boiler; reheat steam temperature; support vector regression; regression coefficient

**摘要:**为解决某电厂300MW电站锅炉再热汽温异常的问题,提出一种基于支持向量回归的建模方法,采用现场数据进行数据建模。建立在数据统计特性基础上的模型具有高的回归相关度,能反映出再热汽温与操作参数之间的内在联系。针对机组存在的再热器出口汽温偏低而部分管壁温度过高的问题进行了回归分析,结果表明模型具有较高的相关系数,且模型复杂度较低,具有好的鲁棒性。作为现场试验辅助手段,对进一步进行参数优化和再热汽温调节具有重要指导意义和参考价值。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(60474064); 国家“973”重点基础研究发展规划项目(2002CB312200)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60474064); The National Basic Research Program (973 Program) (2002CB312200)。

**关键词:** 电站锅炉; 再热汽温; 支持向量回归; 相关系数

## 0 引言

如何提高燃煤电厂运行的安全性、经济性是一个重要课题。虽然火力发电技术已经相当成熟,但由于炉内燃烧及换热的复杂性,仍然有很多问题需要解决。对四角切圆燃烧方式的锅炉来说,再热汽温偏差是一个常见问题,再热汽温调节对于机组的安全性和经济性至关重要,再热汽温过高容易损坏受热面,再热汽温偏低会使机组的热经济性降低。而再热汽温与操作参数之间的关系往往难以确定,建立一个好的模型对机组运行调节具有重要意义<sup>[1]</sup>。

吕崇德等<sup>[2]</sup>系统阐述了大型火电机组的建模与仿真,袁益超等<sup>[3]</sup>对电站锅炉的烟温和汽温分布进行了研究,研究人员也从其它不同角度对锅炉再热汽温调节进行了研究<sup>[4-10]</sup>,并针对不同的问题提出了相应的解决方案。由于现场试验条件的限制,只能凭经验考虑主要因素的影响,且因具体机组而异。本文从另一个角度着眼,利用运行数据对再热汽温与操作参数之间的关系进行描述,作为现场试验的辅助手段,为进一步优化运行提供参考。

某电厂300MW机组在调试过程中出现了再热汽温偏低而再热器管壁温度偏高的问题,为解决这一问题,本文采用支持向量回归(support vector regression, SVR)算法对现场数据进行分析,寻找再热汽温与操作参数之间的内在联系。SVR模型是基于现场数据进行回归建模的,具有一定的普适性,不依赖于机组具体情况,只要采集一定的运行数

据,即可进行回归建模,并基于该模型进行参数优化,对再热汽温进行调节。

## 1 支持向量回归建模简介

V. Vapnik<sup>[11]</sup>在90年代中期基于统计学习理论(statistical learning theory, SLT)提出了支持向量机算法(support vector machine, SVM),该算法最初用于分类问题,在模式识别领域得到了很好的应用<sup>[12]</sup>,后来又不断扩展到其它领域,在回归建模方面也有好的表现<sup>[13]</sup>。SVR可以表述为:给定训练样本集 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_l, y_l)\}$ ,其中 $x_i \in R^n$ ,  $y_i \in R, i=1, 2, \dots, l$ ,在函数集 $f(x, a)$ 中寻找回归函数 $f(x, a^*)$ ,使得损失函数 $L(x, y, f(x))$ 在训练集上最小。损失函数采用 $e$ 不敏感损失函数:

$$|y - f(x)|_e = \max(0, |y - f(x)| - e) \quad (1)$$

SVR问题可以利用SLT理论转化为下述优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{a, a^*} & \frac{1}{2} (a - a^*)^T Q (a - a^*) + z^T (a - a^*) \\ & e^T (a_i - a_i^*) = 0 \\ & e^T (a_i + a_i^*) = Clv \\ & 0 \leq a_i, a_i^* \leq C, \quad i=1, \dots, l \end{aligned} \quad (2)$$

通过求解式(2)即可得到回归模型。对于非线性可分问题,可以通过核函数的方法将输入空间转换到线性可分的高维希尔伯特(Hilbert)空间中进行求解,相应地,回归模型为

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (a_i^* - a_i) K(x_i, x) + b \quad (3)$$

其中: $K(x_i, x)$ 为核函数。常见核函数有线性、多项式、径向基函数(radial base function, RBF)等,本文采用RBF核函数 $K(x_i, x) = \exp(-g \|x - x_i\|^2)$ 。

## 2 基于SVR的再热汽温模型构建

针对某电厂300MW发电机组锅炉进行分析研究。机组设计运行方式为带电网基本负荷,可参与调峰,参与自动发电控制(automatic generating control, AGC)。机组为亚临界参数汽包炉,汽水循环系统采用控制循环、一次中间再热,锅炉结构为单炉膛、固态排渣、全钢悬吊结构,半露天布置,燃烧方式为四角切圆燃烧,再热汽温调节手段为燃烧器摆动调温,喷水减温作为辅助调温手段,用于事故等应急情况。采用直吹式制粉系统,平衡通风,微负压运行。

机组在调试过程中出现了末级再热器出口汽

温偏低而再热器壁温偏高的情况,再热器两边温度偏差较大。这类问题在采用四角切圆燃烧方式的锅炉中比较常见,四角切圆燃烧方式锅炉炉膛内旋转气流进入水平烟道时的扭转残余使得在水平烟道烟气流场分布不均<sup>[1]</sup>。在调试过程中,烟气温度偏差曾一度达57℃,再热器出口汽温分布不均。采用SVR算法对操作参数进行建模分析,基于现场数据进行回归,寻找能够反映再热汽温与操作参数内在联系的模型。由于该机组锅炉再热汽温主要通过燃烧器摆角进行调节,喷水减温作为辅助调节手段,主要用于事故情况下,因此选择燃烧器摆角,磨煤机投运组合和减温水量作为操作参数进行回归建模;由于过剩空气系数以及一、二次风的比例直接影响炉内流场,从而影响各受热面的传热情况,过量空气系数以及一、二次风比例也是必不可少的燃烧调节参数,过量空气系数通过总风量进行调节;燃料量也是一个重要因素,采用燃煤消耗量作为一个参数,燃料量与机组负荷相对应,随负荷升降而相应调整。针对该机组出现的问题,模型目标选择末级再热器出口汽温。运行中应使再热器出口蒸汽温度尽量接近额定值且各测点之间的变异越小越好,再热汽温过低、过高以及汽温偏差过大都不利于机组运行,管壁温度在满足蒸汽出口温度的前提下越低越好,有利于延长再热器的使用寿命,增加安全系数。

SVR模型采用 $e$ 不敏感损失函数作为损失函数、RBF函数作为核函数,使用Libsvm<sup>[14]</sup>软件包作为基本的算法框架。基于式(1)~(3)的算法中参数 $C$ 、 $n$ 、 $g$ 对模型有重要影响,采用交叉验证等方法进行选择。如上所述,自变量为磨煤机投运组合、燃烧器摆角和喷水减温器减温水量等现场可调的操作参数,因变量为需要控制的参数点,针对末级再热器的出口汽温所存在的问题,本文选取末级再热器出口汽温以及各测点之间的方差作为因变量。支持向量回归算法属于有监督的机器学习算法,训练集采用从现场DCS采集到的数据。每个样本包含因变量和所有可调操作参数组成的自变量。在训练集上进行学习训练,得到回归模型,然后在此基础上进行寻优,可找到使得目标参数符合要求的可调参数组合,并将得到的参数组合反馈到现场进行验证试验。

训练数据包含了目标值(因变量)以及可调参数值(自变量),结合锅炉燃烧器布置结构以及二次

风风口布置情况，选取下列参数作为支持向量回归训练数据的属性：①燃烧器摆角，炉膛辅助风挡板的位置，这些位置参数直接影响炉膛内的燃烧状况，燃烧中心的位置，烟气在炉膛内的流动情况，流场分布；②二次风的配风方式，配风也同样直接影响炉内燃烧，二次风风向影响炉内燃烧和烟气流向，二次风比例占总风量的70%左右，对炉内烟气运动起着主要作用，因此调整二次风的配风方式对于锅炉各部分传热情况和炉内燃烧有着直接的控制作用；③OFA挡板开度，OFA可以有效减少炉膛出口烟气的旋转残余，调整OFA挡板位置可以起到调节再热汽温的作用；④喷水减温器减温水量直接影响再热汽温，但作为辅助调节手段，多用于事故情况；⑤炉膛压力、一、二次风温、风压、主蒸汽压力、机组负荷等参数也作为影响因素进行考虑。由于煤种相对固定，燃料为设计煤种，暂不考虑煤种变化带来的影响。

该机组主要依靠燃烧器摆动调温，因此解决再热汽温存在的问题需要主要调节燃烧器摆角来进行。通过燃烧器摆角可以直接改变炉内燃烧和流动状况，但底层燃烧器摆角还起着托火焰的作用，防止火焰下冲造成水冷壁底部及冷灰斗结渣，故不作调整，主要调整上面几层燃烧器的摆角。同时，通过调节各风口挡板开度来调节配风情况，从而达到调整炉内流动、燃烧情况的目的。对于一定的负荷，燃料量相对稳定，但在不同燃烧器组之间进行组合，由于每组燃烧器对应一台磨煤机，可以通过磨煤机不同组合来调节燃煤分配。SVR算法对这些参数的已知数据进行回归分析，找到能够描述再热汽温与各变量之间潜在关系的模型。支持向量回归算法参数 $n$ 、 $C$ 、 $g$ 采用交叉验证(cross validation, CV)策略选择。数据在运行过程中DCS系统自动记录，调试过程中为了安全考虑，燃烧器摆角调整没有投入自动，采用手动调节燃烧器的摆角。按照上述目标函数及相应的可调参数，对数据进行预处理，得到用于回归分析的数据，每条数据记录包含了目标函数值和可调参数值，这些数据背后暗含的规律对机组的运行调整具有重要指导意义。

### 3 再热汽温的SVR回归分析及讨论

采用上述方法针对机组出现的问题进行回归分析，所采用的数据是机组在70%及以上负荷时DCS系统自动采集到的，所使用的数据样本每隔一

小时采集一次。各主要变量及目标函数在调试时间段内的变化如图1所示。由图可见，在调试过程中参数变化没有明显规律，传统的回归建模方法很难处理多因素的复杂系统。

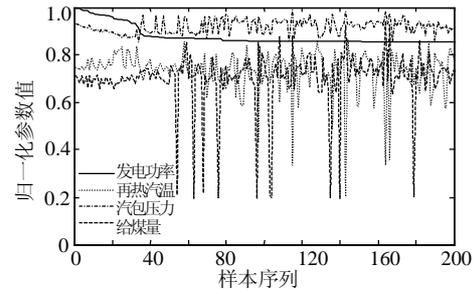


图1 各主要变量的变化情况

Fig. 1 Main parameters variation with time

采用上述现场数据进行回归建模，就要建立的SVR模型是再热器出口汽温与各操作参数之间的关系，由于炉内复杂多变的物理化学过程使这种关系很难用准确的机理模型来描述，现有机理模型主要从微观机理对燃烧过程进行研究，基于冷态试验的经验模型也有不少进展<sup>[1]</sup>，但这些模型大都描述锅炉系统的某个局部过程<sup>[2]</sup>，对于蒸汽出口参数与操作参数之间的关系模型则少有研究，本文从系统的角度采用数据的统计特性对再热汽温与操作参数之间的内在联系进行研究。

锅炉系统中很多参数可以利用现有控制及检测系统方便地获得，这样就可以利用系统所测参数来描述系统。这里采用的数据是在70%负荷以上运行时采集的，这些高负荷下的数据相对稳定，没有剧烈波动，一定程度上避免了系统时滞的影响。然而仅仅知道系统处于什么状态是不够的，更重要的是能够预测系统在不同的运行参数下处于什么状态。因此，如何从这些数据中寻找潜在的规律和关系就是数据建模所要解决的问题。SVR基于数据的统计特性，在大量数据中寻找规律，仅仅采用那些对模型最有用的数据来描述系统。支持向量的数目远小于整个样本的数目，很多样本处于同一个状态，每类样本中只需要少数就可代表该类样本特性。

基于现场数据对两台300MW机组再热汽温与操作参数之间的关系进行建模分析。模型在测试数据上的相关系数和均方差与算法参数之间的简单对比见表1。其中 $C$ 、 $n$ 、 $g$ 是SVR算法参数， $N_{SV}$ 是模型中包含的支持向量个数， $R$ 为模型对测试数据预测结果与真值的相关系数， $e_{MSE}$ 为模型对测试

数据预测的均方差(mean squared error)。除了  $e_{MSE}$  具有温度平方( $^{\circ}C^2$ )的量纲外,其它量都是无量纲量。一般地,支持向量的个数越多,模型复杂性越大,在训练数据上的拟合度越高,但对未知数据的预测能力却不一定高,这是由于可能存在过拟合现象,表1也说明了这个问题。由于所采集的锅炉系统参数样本很多,而系统状态却远没有这么多,由表1可知,用少量的关键样本(支持向量)就可以较好地描述系统,即通过少量现场数据寻找系统规律,这也是该方法的优势所在。上述结果是将采集到的现场数据随机分为两份,其中一份用来产生统计模型,另外一份对模型进行测试,表1中的结果就是SVR模型在测试数据上的预测结果。

表1 不同SVR参数时的再热汽温模型预测结果  
Tab. 1 Model prediction results with different SVR parameters

机组	$N_{SV}$	$C$	$n$	$g$	$e_{MSE}/^{\circ}C^2$	$R$
5号	44	128	0.01	0.5	29.29	0.7503
	89	128	0.03	0.5	21.8	0.8197
	116	128	0.05	0.5	17.31	0.8623
	137	128	0.07	0.5	16.36	0.8619
	149	128	0.09	0.5	15.17	0.8501
	174	128	0.11	0.5	13.76	0.8895
	195	128	0.13	0.5	14.22	0.8771
	226	128	0.15	0.5	13.23	0.8835
	235	128	0.17	0.5	12.96	0.8893
258	128	0.19	0.5	14.9	0.8687	
6号	70	1	0.01	0.0156	12.41	0.8720
	116	128	0.03	0.5	6.63	0.9184
	148	128	0.05	0.5	6.42	0.9116
	174	128	0.07	0.5	5.22	0.9318
	203	128	0.09	0.5	5.06	0.9339
	224	128	0.11	0.5	5.26	0.9324
	250	128	0.13	0.5	5.59	0.9308
	269	128	0.15	0.5	4.80	0.9349
	287	128	0.17	0.5	4.27	0.9454
312	128	0.19	0.5	4.93	0.9376	

图2和图3分别为某电厂新建的5号机组和6号机组在不同的算法参数( $C$ 、 $n$ 、 $g$ )下采用支持向量回归算法对测试样本的预测结果与实测数据之间的对比关系。为保证模型的泛化能力,算法参数 $n$ 取较小的值,从0.01~0.19,表示模型样本占总样本的比例,而参数 $C$ 和 $g$ 则是在模型训练过程中进行优化选择的。如图所示,实线代表的是现场实测到的再热汽温,虚线代表的是SVR模型的预测结果,由图可知,支持向量回归得到的模型有较高的拟合度,这一点也可从表1中看到。进一步说明了模型能够较好地揭示再热汽温与操作参数之间的内在

关系。为了清晰说明模型回归预测结果,图中结果随机从测试样本中抽取一小部分。同时这种模型算法能够搜索到系统关键点,利用这些关键点(支持向量)来描述系统,有效剔除数据中的大量冗余信息,对电站锅炉运行数据进行定期分析有很大优势。

由图2和图3可知,基于SVR的数据模型具有高的相关度,能较好地反映各可调变量对再热汽温的影响。克服了蒸汽参数与锅炉运行参数之间关

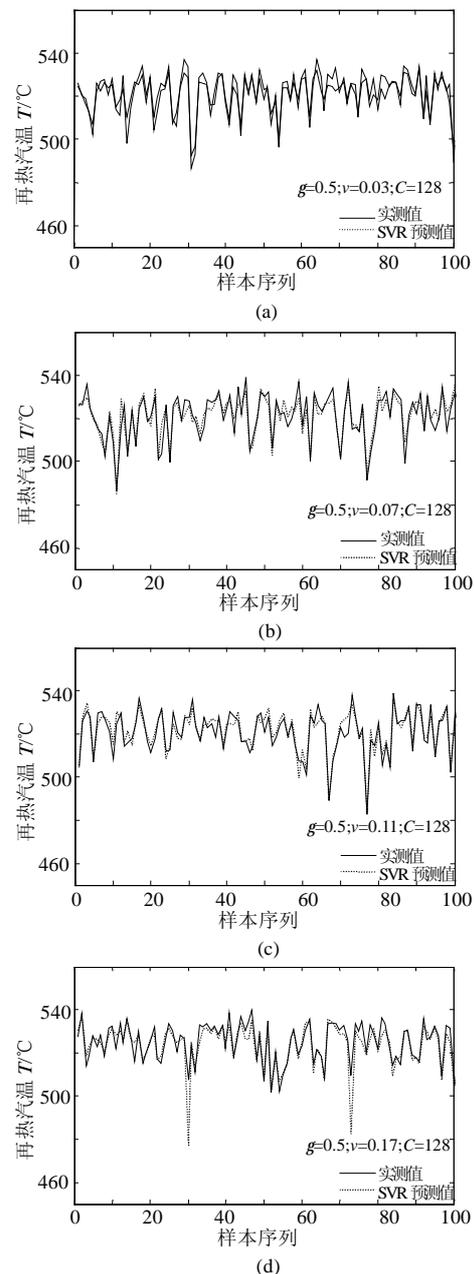


图2 5号机组不同SVR参数的回归结果  
Fig. 2 Regression results with different parameters on 5# unit

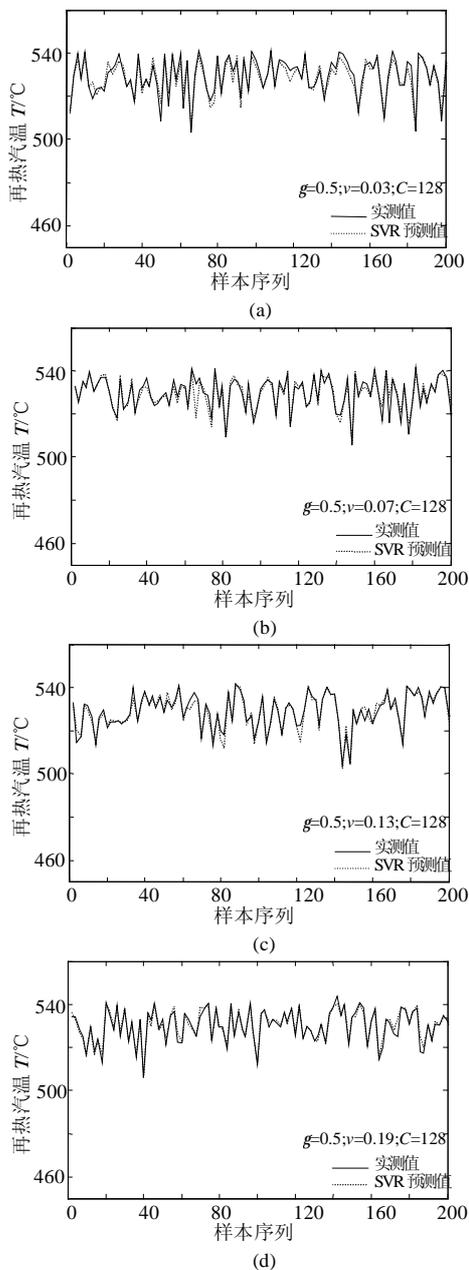


图3 6号机组不同SVR参数的回归结果

Fig. 3 Regression results with different parameters on 6# unit

系难以直接描述的困难。基于模型可以对运行参数进行离线寻优，进而应用得到的优化参数进行现场调试及运行指导。同时，该模型对锅炉本身无依赖性，只依赖于相关的现场实测数据，而这些数据可以很容易地从现场相应的控制、监测和记录设备上获得。所不同的是，不同的机组，对蒸汽参数以及运行操作参数的调节对象可能不同，这在建立模型时的特征选择中可以区别对待，特征选择时可以结合专家经验和相应的锅炉结构因素等，同时可以采

用一些特征选择方法在众多参数中选出对结果有影响的那些参数，然后利用所选的参数进行统计回归分析，得到的模型即可描述相应的系统。特征选择的方法很多，可以采用主成分分析 (principal component analysis, PCA)、独立成分分析 (independent component analysis, ICA) 选择参数<sup>[15]</sup>。

建模只是一种了解系统特性的手段，更有意义的工作是对运行参数进行优化，使其尽量接近额定参数，从而保证机组的安全性和高的运行效率。准确的模型是参数优化的基础。支持向量回归建模对于再热汽温的描述表明了该模型的有效性和可靠性，可以基于该模型进一步优化操作参数，调节再热汽温，从而解决运行中遇到的问题。对电站锅炉运行数据进行定期分析，发现运行数据蕴含的规律，为机组运行提供指导，提高机组的安全性和经济性。

#### 4 结论

四角切圆燃烧方式的电站锅炉往往容易产生汽温偏差问题，针对某电厂300MW机组在调试运行过程中遇到的问题，采用支持向量回归算法对再热汽温进行回归建模，利用现场实测数据进行回归分析，建立对象的数据模型。结果表明该模型能够描述各相关参数（燃烧器摆角等20多个参数）对再热汽温的影响关系，模型具有较高的相关度，为进一步进行系统优化、汽温调节提供了可靠的模型基础。基于该模型进行离线参数寻优，对调试工作进行指导，可以缩短调试周期；对机组运行提供指导，可以提高机组运行的安全性和经济性，作为运行、调试的辅助分析手段，对机组实际运行具有重要指导意义和参考价值。

#### 参考文献

- [1] 岑可法, 周昊, 池作和. 大型电站锅炉安全及优化运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [2] 吕崇德, 任挺进, 姜学智, 等. 大型火电机组系统仿真与建模[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [3] 袁益超, 刘聿拯, 陈之航. 大型电站锅炉烟温与汽温分布理论分析与试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 56-61.  
Yuan Yichao, Liu Yuzheng, Chen Zhihang. Theoretical analysis and experimental research on temperature distribution of flue gas and steam in large capacity utility boilers[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 56-61 (in Chinese).
- [4] 华志刚, 吕剑虹, 张铁军. 状态变量-预测控制技术在600MW机组再热汽温控制中的研究与应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12):

- 103-107.  
Hua Zhigang, Lü Jianhong, Zhang Tiejun. Research and application of state variable-predictive control in 600MW unit reheater temperature control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 103-107(in Chinese).
- [5] 李文彦, 康志忠, 宋之平, 等. 600MW切圆燃烧锅炉的烟气偏差及控制技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 163-167.  
Li Wenyan, Kang Zhizhong, Song Zhiping, et al. Research on gas temperature and velocity deviation and control technique of tangentially-fired boiler of 600MW unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 163-167(in Chinese).
- [6] 李永华, 陈鸿伟, 孟凡军. 300MW锅炉优化燃烧调整试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 216-220.  
Li Yonghua, Chen Hongwei, Meng Fanjun. An experimental study on optimal combustion control for a boiler of 300MW[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 216-220(in Chinese).
- [7] 焦景贵, 姜祖光, 高秀芬. 摆动燃烧器调节再热汽温试验[J]. 电站系统工程, 1998, 14(4): 11-15.  
Jiao Jinggui, Jiang Zuguang, Gao Xiufen. Test on reheat steam temperature regulation by tilting burner[J]. Power System Engineering, 1998, 14(4): 11-15(in Chinese).
- [8] 李道林. 国产电站锅炉再热汽温调节实用技术探讨[J]. 动力工程, 1999, 19(1): 17-22.  
Li Daolin. Discussion on the practical technology for reheat steam temperature adjustment in domestic utility boilers[J]. Power Engineering, 1999, 19(1): 17-22(in Chinese).
- [9] 李永光, 朱珍锦, 刘松, 等. 一种消除四角喷燃锅炉水平烟道流速偏差的新方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 18-21.  
Li Yongguang, Zhu Zhenjin, Liu Song, et al. A new method for reducing the flow velocity deviation of tangentially fired utility boiler horizontal gas pass[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 18-21(in Chinese).
- [10] 李彦鹏, 张强, 顾璠, 等. 二次风反切对大容量切向燃烧锅炉烟气偏差影响的数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 33-37.  
Li Yanpeng, Zhang Qiang, Gu Fan, et al. Numerical study on the effect of reverse swirl of secondary air on flue gas imbalance in large tangentially fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 33-37(in Chinese).
- [11] Vapnik V. The nature of statistical learning theory[M]. 2<sup>nd</sup> edition. New York: Springer, 1998.
- [12] Burges C. A tutorial on support vector machines for pattern recognition [J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1998, 2(2): 121-167.
- [13] Alex J. Smola, Bernhard Schölkopf. A tutorial on support vector regression[J]. Statistics and Computing, 2004, 14(3): 199-222.
- [14] Chih-Chung Chang, Chih-Jen Lin, LIBSVM: A library for support vector machines[EB]. Taipei, 2001. Software Available at <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>.
- [15] Jeff Fortuna, David Capson. Improved support vector classification using PCA and ICA feature space modification[J]. Pattern Recognition, 2004, 37(6): 1117-1129.

收稿日期: 2005-11-08。

作者简介:

黄景涛(1977—), 男, 博士研究生, 主要从事智能算法, 统计学习理论及其应用研究, [jthuang@iipc.zju.edu.cn](mailto:jthuang@iipc.zju.edu.cn);

马龙华(1965—), 男, 博士, 副教授, 从事智能算法, 多目标规划, 工业过程自动化方面的理论和应用研究;

茅建波(1976—), 男, 硕士, 工程师, 从事电站锅炉的调试与技术改进等研究工作;

钱积新(1939—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统控制、建模及优化, 企业综合自动化, 智能决策系统等方面的研究和工业应用。

(编辑 贾瑞君)