

支持向量机灰熔点预测模型研究

赵显桥¹, 吴胜杰², 何国亮², 王春林³

(1. 山东电力研究院, 山东 济南 250002; 2. 山东沾化热电有限公司, 山东 沾化 256800;
3. 杭州电子科技大学, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 根据电厂对混煤灰熔点计算的需求, 采用支持向量机算法和 BP 神经网络算法对灰熔点进行了建模和对比研究, 灰熔点模型采用灰成分作为输入量, 灰熔点(ST) 作为输出量, 用所建模型对单煤和混煤灰熔点进行预测, 然后将预测结果与实验结果进行比较。支持向量机模型对单煤和混煤的预测误差分别为 0.57% 和 1.94%, BP 神经网络模型对单煤和混煤的预测误差分别为 1.925% 和 10.43%, 结果表明, 支持向量机模型对单煤和混煤灰熔点的预测更精确。

关 键 词: 灰熔点; 支持向量机; BP 神经网络; 预测

中图分类号: TQ533; TP273 文献标识码: A

引 言

灰熔点(ST) 对锅炉燃烧的安全性和经济性有很大影响, 是重要的煤质指标之一。由于燃煤紧张, 多数电厂无法得到设计煤种, 掺烧混煤已成为常态。混煤的灰熔点不符合简单线性加权规律, 如何获得混煤的灰熔点成为电厂面对的重要难题。国内外很多研究机构和学者做过此方面的研究, 普遍认为混煤的灰熔点是由其灰成分 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO、MgO、TiO₂、Na₂O、K₂O 的质量百分数所决定的^[1~3], 但精确的推导关系还有待于进一步研究。目前, 主要是利用学习算法通过数据训练建立灰成分 - 灰熔点模型来进行混煤灰熔点预测。

近年来, 支持向量机(Support Vector Machine, SVM) 已经成为了模式识别和数据挖掘领域的重要研究工具^[4~6]。在学习过程中它采用结构风险最小化(Structure Risk Minimization, SRM) 原则, 兼顾经验风险和泛化能力, 其拓扑结构只与支持向量有关, 从而减小了计算量, 提高了计算速度。

BP(Back Propagation) 神经网络被广泛地用于语言识别和自适应控制等领域, 已证明 3 层 BP 神经网络可以实现任意的 n 维到 m 维的映射, 可以逼近任意非线性连续函数。

本研究针对某电厂的实际需求, 分别应用支持向量机算法和 BP 神经网络算法建立了灰熔点预测模型, 并对两种模型的预测结果进行对比分析, 为电厂实炉掺烧混煤的灰熔点预测提供参考。

1 灰熔点实验及数据预处理

表 1 煤样灰熔点与灰成分测定结果 (%)

| 煤种实验编号 | ST / °C | CaO | MgO | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Na ₂ O + K ₂ O |
|--------|---------|-------|------|------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 1426 | 8.65 | 0.01 | 40.96 | 7.66 | 1.44 | 33.83 | 0.52 |
| 2 | >1500 | 2.43 | 0.01 | 43.09 | 4.21 | 2.14 | 35.45 | 0.28 |
| 3 | >1500 | 3.62 | 0.01 | 42.28 | 4.14 | 1.93 | 36.90 | 0.22 |
| 4 | 1157 | 15.49 | 1.23 | 41.54 | 10.08 | 0.95 | 12.57 | 1.08 |
| 5 | 1412 | 1.65 | 0.13 | 53.11 | 12.72 | 1.20 | 23.75 | 1.06 |
| 6 | 1210 | 17.84 | 2.19 | 39.42 | 8.16 | 1.26 | 13.72 | 0.67 |
| 7 | 1486 | 4.97 | 0.13 | 51.16 | 12.72 | 1.20 | 23.75 | 1.23 |
| 8 | >1500 | 3.00 | 0.01 | 61.81 | 4.14 | 1.93 | 36.90 | 0.37 |
| 9 | 1312 | 6.25 | 0.01 | 53.18 | 4.21 | 2.14 | 35.45 | 0.68 |
| 10 | >1500 | 2.97 | 1.23 | 46.73 | 10.08 | 0.95 | 12.57 | 0.15 |
| 11 | 1381 | 2.85 | 0.01 | 52.81 | 7.66 | 1.44 | 33.83 | 0.83 |
| 12 | >1500 | 1.34 | 2.19 | 54.98 | 8.16 | 1.26 | 13.72 | 1.06 |

针对某电厂的需求, 为进行配煤的研究, 采集其煤场中常用的 12 种煤样, 用角锥法测定灰熔点(ST) 温度, 利用 XJK12 型陶瓷化学成分分析仪测定灰成分, 灰熔点及灰成分测试结果如表 1 所示。为满足建模的需要并使模型具有较好的性能, 将灰熔点大于 1 500 °C 的煤样(限于实验条件无法获得具体数据) 设定为 1 500 °C(建模需要具体数值)。

为研究模型对混煤灰熔点预测情况, 在 12 个煤样中选择了 10 个煤样进行了两两掺混, 掺混煤样编号和配比比例如表 2 所示。并测定混煤灰熔点, 测

收稿日期: 2010 - 06 - 23; 修订日期: 2010 - 10 - 27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60904058)

作者简介: 赵显桥(1980 -), 男, 山东鄄城人, 山东电力研究院工程师。

定方法与单煤一致。

表 2 煤种掺配表

| 混煤编号 | 掺混煤种 | 配比比例 |
|------|-------|------|
| 1 | | 5:5 |
| 2 | 1:7 | 4:6 |
| 3 | | 6:4 |
| 4 | 9:11 | 5:5 |
| 5 | | 5:5 |
| 6 | 2:3 | 6:4 |
| 7 | | 4:6 |
| 8 | | 2:8 |
| 9 | | 3:7 |
| 10 | | 4:6 |
| 11 | 5:6 | 5:5 |
| 12 | | 6:4 |
| 13 | | 7:3 |
| 14 | | 8:2 |
| 15 | | 5:5 |
| 16 | 11:12 | 6:4 |
| 17 | | 4:6 |

2 煤灰熔点 (ST) 的建模

2.1 支持向量机建模

灰熔点 (ST) 建模采用 7 个输入量和一个输出量: 输入量为表 1 中各灰成分质量百分比, Na 和 K 的氧化物对灰熔点的影响类似, 且所占比例较小, 合并为一个输入量 ($K_2O + Na_2O$); 输出量为灰熔点 (ST)。用支持向量机算法建模, 取 ϵ 精度为 0.01, 当训练误差小于 0.001 时停止训练, 获得模型。核函数的选择对于支持向量机回归分析有很大影响, 文献 [7] 的研究表明径向基函数比线性函数、sigmoid 函数和多项式函数的预测精度高, 因此选用径向基函数 ($\exp(-g \times |x_i - x_j|^2)$) 作为核函数, 并用遗传算法对待定参数 g (径向基函数中的参数) 和 C (支持向量机中罚因子) 进行寻优, 寻优区间根据文献 [10] 分别设定为 (0, 200) 和 (0, 500)。遗传算法群体规模设为 50, 杂交概率设为 0.8, 变异概率设为 0.25, 进化代数设为 1000, 评价函数取为检验样本的均方差, 评价函数取最小值时, 获得最优参数 g 和 C 。

建模选用 3 ~ 12 号煤样的实验数据为训练样本, 1 号和 3 ~ 12 号煤样的数据为检验样本, 应用训练样本和检验样本进行支持向量机建模训练和校验, 并用所建模型对所有煤样灰熔点作出预测。图

1 为支持向量机模型对所有单煤灰熔点 (ST) 的预测情况, 最大相对误差为 2.4%, 平均相对误差为 0.57%, 说明该模型对单煤作出了比较精确的预测。图 2 为支持向量机模型对表 2 中混煤灰熔点预测的情况 (预测时输入量 (灰成分) 按加权平均计算获得) 混煤预测最大误差为 4.67%, 平均误差为 1.94%, 预测结果比较精确。

2.2 BP 神经网络建模

BP 神经网络模型采用 3 层结构, 输入量和输出量与支持向量机模型相同, 隐层采用 5 个节点, 第一到第二层传递函数为 radbas (径向基) 函数, 第二层到输出层为 purelin (线性) 传递函数。训练数据与支持向量机模型相同, 训练算法采用 matlab 自带的 trainlm 算法, 设定训练误差小于 0.001 时停止训练。

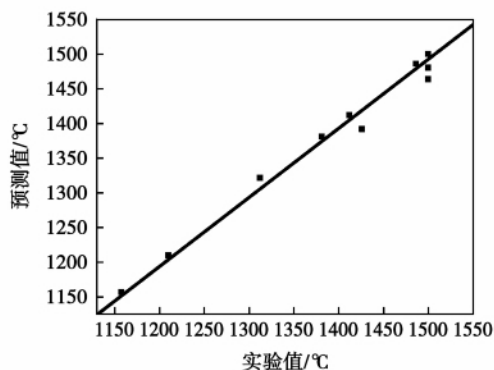


图 1 支持向量机模型单煤灰熔点预测情况

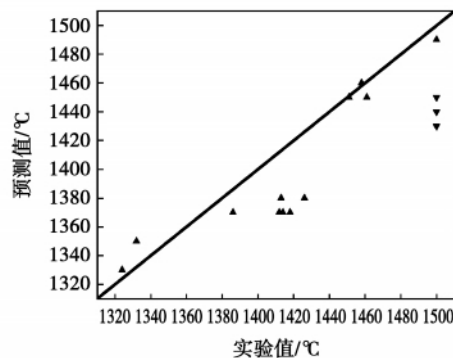


图 2 支持向量机模型混煤灰熔点预测情况

3 为 BP 神经网络模型对所有单煤灰熔点 (ST) 数据的预测情况。最大相对误差和平均相对误差分别为 10.63% 和 1.925%, 对未参与训练的样本 2 的预测误差大, 说明 BP 神经网络模型的泛化能力较差。图 4 为 BP 神经网络模型对所有混煤的灰熔点预测的情况 (输入量 (灰成分) 按加权平均计

算获得) ,混煤的预测中最大误差为 49.09% ,平均误差为 10.43% 。BP 神经网络模型对混煤的预测误差较大 ,这主要与其泛化能力和建模样本较少有关。

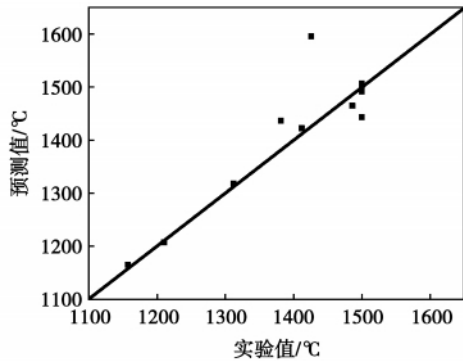


图3 BP神经网络单煤灰熔点预测情况

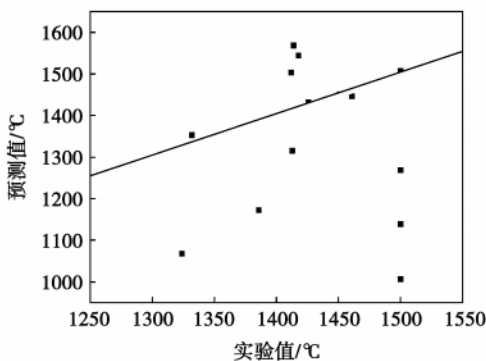


图4 BP神经网络混煤灰熔点预测情况

3 模型预测结果分析

从模型预测效果看 ,支持向量机模型明显优于BP神经网络模型 ,尤其是对于混煤灰熔点的预测 ,这主要与以下因素有关:(1) 训练数据较少 ,BP神经网络的训练需要相对较多的数据 ,而支持向量机则是适于小样本的算法;(2) 训练目标函数不同 ,BP神经网络采用经验风险最小化的训练原则 ,其泛化能力得不到保证;支持向量机采用结构风险最小化的训练原则 ,兼顾了经验风险和泛化能力。对于某电厂来说 ,其所用煤种相对固定且有限 ,配煤计算需要较强的泛化能力 ,因此支持向量机算法比一般的BP神经网络更适合于电厂配煤灰熔点的建模计算。

支持向量机模型单煤预测的最大误差发生在煤样2的预测上(是计算结果 ,图1中有所体现 ,但无

法看到是2号煤样) 。主要原因是灰熔点被设定为1500℃ ,且不在模型训练样本和检验样本中 ,因此误差相对较大。大多数的单煤煤样被包含在训练样本和检验样本中 ,故平均误差小(0.57%) 。支持向量机模型对单煤的整体预测比较精确。

混煤可分为3种掺混方式:(1) 掺混的两种单煤灰熔点都小于1500℃;(2) 掺混的两种单煤灰熔点都大于1500℃;(3) 掺混的两种单煤中一种单煤的灰熔点大于1500℃ ,且被设定为1500℃ ,另一种单煤灰熔点小于1500℃。从预测情况来看 ,支持向量机模型预测的掺混方式3的误差较大 ,最大误差就产生于以掺混方式3获得的混煤的预测。误差与将一种煤样的灰熔点设定为1500℃有很大关系 ,去除掺混方式3(图2中所示)后 ,掺混方式1、2的最大预测误差为3.39% ,平均预测误差为1.49% ,精度有较大提高。模型对于掺混方式2的预测误差较小 ,是因为两种参与掺混煤的灰熔点都被设定为1500℃ ,实际混煤的灰熔点也大于1500℃。方式1为两种精确灰熔点煤的掺混 ,预测误差理应较小 ,但是模型训练时 ,有4个设定灰熔点的样本参与 ,因此可能会对学习造成一定的影响 ,使得的预测误差增大。

从以上分析可以看出 ,对灰熔点大于1500℃的样本(5个)设定为1500℃是导致误差的主要原因 ,人为设定的灰熔点数据会对煤样的灰熔点与灰成分之间的规律造成一定的影响。另外 ,模型的检验样本中包含未参加训练的样本 ,以增加经验风险为代价增强泛化能力 ,也会使的某些样品的预测误差增大。

4 结论

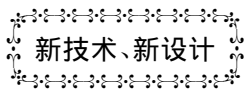
支持向量机从理论上保证模型的泛化能力 ,通过对参数优化可以获得预测能力较好的模型 ,支持向量机算法适用于灰熔点的建模计算 ,所建模型较好的实现了对混煤灰熔点的预测。通过研究得到以下结论:

- (1) 支持向量机建模方法比一般的BP神经网络建模方法所建模型的泛化能力强;
- (2) 经过优化的支持向量机模型较好的实现了根据灰成分分析预测混煤和单煤灰熔点的目标。如果在实验条件允许的情况下 ,获得所有煤样灰熔点的精确数据 ,支持向量机模型的预测能力会更好;
- (3) 支持向量机灰熔点模型可以用来指导电厂

配煤掺烧,对保证电厂锅炉安全、经济运行有重要意义。

参考文献:

- [1] GRAY V R. Prediction of ash fusion temperature from ash composition for some New Zealand coals[J]. Fuel, 1987, 66(9): 1230 - 1239.
- [2] LOLJA S A, HAXHI H, MARTIN D J. Correlations in the properties of Albanian coals[J]. Fuel 2002, 81(9): 1095 - 1100.
- [3] LOLJA SAIMIR A, HAXHI H, DHIMITRI R et al. Correlation between ash fusion temperatures and chemical composition in Albanian coal ashes[J]. Fuel, 2002, 81(17): 2257 - 2261.
- [4] KALOGIROU S A. Artificial intelligence for the modeling and control of combustion processes; A review[J]. Progress in Energy and Combustion Science 2003, 29(6): 515 - 566.
- [5] 王春林, 周 昊, 周樟华 等. 基于支持向量机的大型电厂锅炉飞灰含碳量建模[J]. 电机工程学报, 2005, 25(20): 72 - 76.
- [6] VAPNIK. 统计学习理论[M]. 张学工, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [7] KEERTHI K, LIN C J. Asymptotic behaviors of support vector machines with Gaussian kernel [J]. Neural Computation, 2003, 15(3): 1667 - 1689.



新一代汽轮机的设计思路

《Теплоэнергетика》2010 年 12 月报道,分析了现代汽轮机设计思路及其在超超临界蒸汽轮机上的应用和发展。提供了针对 700 MW 功率超超临界双缸汽轮机的初步设计的研究成果。给出了俄罗斯建造这些汽轮机所遇到的主要问题。

这些装置典型的经济—技术指标如下:

| | |
|--------------------------|-----------|
| 汽轮机功率, MW | 575 - 700 |
| 蒸汽初压, MPa | 30 |
| 蒸汽温度, °C | |
| 锅炉后主蒸汽 | 600 |
| 中间再热蒸汽过热器后 | 600 |
| 给水温度, °C | 302 |
| 效率: | |
| 汽轮机装置(净效率) | 0.49 |
| 锅炉 | 0.93 |
| 动力装置 | 0.46 |
| 0.49 净效率下的耗热率, kJ/(kW·h) | 7347 |

为减少对末级动叶的浸蚀,应规定设置末级静叶内加热,并且如果可能,也应对次末级静叶采用内部加热。静叶加热,显然是大量减少浸蚀的最有效手段。

与传统的汽轮机装置比较,末级叶片出口面积为 16.27 m² 的未来汽轮机组具有明显的优点。其应用能保证大幅降低汽轮机以及整个电站的造价。

(吉桂明 摘译)

mal power plant featuring a large inertia and uncertainty to any model etc. The main control loops adopted the MFAPC algorithm while the auxiliary control loops employed the conventional PID (proportional, integral and differential) control. The simulation results have verified the effectiveness of the cascade control tactics. **Key words:** pseudo gradient vector, prediction control, superheated steam temperature, cascade control system

基于自适应遗传算法的协调控制系统优化 = **Optimization of a Coordinated Control System Based on the Self-adaptive Genetic Algorithm** [刊, 汉] XIE Xie, LIU Ji-zhen, ZENG De-liang, LIU Ji-wei (College of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 432 ~ 435

For coordinated control systems for elementary units in thermal power plants, presented was a searching method for optimizing the parameters of a multi-variable robust PID (proportional, integral and differential) controller based on the self-adaptive genetic algorithm. With the tracking performance of the controller at the set point serving as the optimization target and the robust performance as a dynamic constraint, the genetic algorithm involving a self-adaptive crossover and variation probability was employed to search optimal parameters of the PID controller. The simulation results show that compared with the PID controller optimized by using the traditional genetic algorithm, the robust PID one based on the self-adaptive genetic algorithm enjoys better load follow-up characteristics and a superior robustness. **Key words:** self-adaptive genetic algorithm, coordinated control system, robustness, PID (proportional, integral and differential) controller

支持向量机灰熔点预测模型研究 = **Study of a Support Vector Machine-based Model for Predicting Melting Points of Ash** [刊, 汉] ZHAO Xian-qiao (Shandong Electric Power Academy, Jinan, China, Post Code: 250002), WU Sheng-jie, HE Guo-liang (Shandong Zhanhua Thermal Power Co. Ltd., Zhanhua, China, Post Code: 256800), WANG Chun-lin (Hangzhou University of Electronic Science and Technology, Hangzhou, China, Post Code: 310018) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 26(4). - 436 ~ 439

To the demand of ash melting point calculation of blended coal in power plants, a model for melting points of ash was established and a contrast study was conducted by using the support vector machine algorithm and BP (back propagation) neural network algorithm. The model in question used the ash composition as an input and the melting point of ash as an output. It was employed to predict the ash melting points of a single coal and blended one. Then, the prediction results were compared with the test ones. The errors of the model based on the support vector machine were 0.57% and 1.94% respectively in predicting the single coal and blended one while those of the model based on the BP neural network were 1.925% and 10.43% respectively in predicting the above-mentioned two

types of coal. The research results show that the model based on the support vector machine is more precise when predicting the ash melting points of a single coal and blended one. **Key words:** ash melting point , support vector machine , BP (back propagation) neural network , prediction

基于退火支持向量的燃煤锅炉结渣特性预测 = Prediction of the Slagging Characteristics of a Coal-fired Boiler Based on an Annealing Support Vector [刊, 汉] XU Zhi-ming , ZHAO Yong-ping , WEN Xiao-qiang (College of Energy Source and Power Engineering , Northeast University of Electric Power , Jilin , China , Post Code: 132012) , MENG Shuo (Harbin City Boiler and Pressure Vessel Inspection Research Institute , Harbin , China , Post Code: 150006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 26(4) . - 440 ~ 444

A support vector machine-based algorithm was used to establish a mathematical model for predicting the slagging characteristics of a coal-fired boiler. The simulation annealing algorithm was employed to optimize the parameters of the model in question. Finally , an optimal parameter combination was obtained. With the demineralization temperature t_{st} , silicon/aluminum ratio $w(\text{SiO}_2) / w(\text{Al}_2\text{O}_3)$, alkali/acid ratio J and silicon ratio G of the coal as well as the non-dimensional tangential circle diameter Φ_t and the actual non-dimensional tangential circle diameter Φ_d of the boiler serving as the input variables and the slagging degree as the output in the model , the test data were used to check the model and optimize its parameters. Then , the optimized model was employed to predict and judge the slagging characteristics of 15 boilers. 14 boilers were correctly predicted with the judgement correctness rate being 93.33% , showing that the method is rational and effective. In the meanwhile , to coordinate with the model in question , an advanced language was used to design a program to develop a corresponding prediction and judgement system. **Key words:** support vector machine , annealing algorithm , coal-fired boiler , slagging

自抗扰控制器对一类热工对象的控制性能研究 = Study of the Control Performance of First Category Thermotechnical Objects by Making Use of an Active Disturbance Rejection Controller [刊, 汉] GUAN Zhi-min (Department of Power Engineering , North China University of Electric Power , Baoding , China , 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011 , 26(4) . - 445 ~ 448

Active disturbance rejection controllers exhibit a very strong adaptability and robustness in a majority of uncertainty systems and in the presence of a strong disturbance in the systems. Based on the control ability of the ARDC , the problems to employ second order active disturbance rejection controllers to control the first category thermotechnical objects with a high order large time delay were studied. The theoretical analysis and numerical simulation results show that the second order ARDC can effectively control the objects of the kind and the control effectiveness is also very ideal , displaying a relatively good adaptability and robustness to the disturbance from the outside and uncertain