

# 数据驱动的 BFG/Coal 混烧锅炉 热效率建模与优化操作

王建国,程华利,肖前平,马世伟

(上海大学 机电工程与自动化学院 上海电站自动化技术重点实验室 上海 200072)

**摘 要:** 基于实际操作数据提出了一种数据驱动的混烧锅炉热效率建模与优化操作策略。首先,过程输入变量转换为具有物理统计意义的 3 个派生变量;然后引入 NNG(非负绞杀)变量选择算法和 ARIMA(自回归积分滑动平均)校正方法,给出了一种自适应建模方法;最后提出了基于模型的混烧锅炉的优化操作策略,并将之应用于锅炉优化操作。研究表明,采用基于模型的优化操作策略的混烧锅炉具有较大的节能空间,热效率的平均提升量为 0.32%。

**关 键 词:** 多燃料锅炉;热效率;NNG;变量选择;数据驱动  
中图分类号: TK223.7 文献标识码: A

## 引 言

BFG(高炉煤气)是大型钢铁厂生产过程中的副产品,是一典型的低热值气体燃料。由于钢铁厂批次生产的特点,BFG在供给流量和热值都是不稳定的。为了保持锅炉的稳定运行,需调整煤的流量以补充变化的 BFG 燃料供给<sup>[1]</sup>。人工神经网络和进化算法可以用来处理非线性问题,但存在着过拟合和不具有解释性的不足。主成分分析、偏最小二乘算法及典型相关分析可以压缩大批传感器变量为少量关键潜变量,但其中包含大量预测变量的不同信息,操作人员不能从中理解具有物理意义的输入输出关系从而聚焦几个易于控制的关键因素。

合适的变量选择在大规模系统建模中是一个重要组成部分。一些研究显示,通过从大量输入变量中选择部分变量对燃烧过程建模,具有更精确的预测精度<sup>[1]</sup>。近来,设置“贪婪”模型的某些系数为零的变量选择方法,得到了越来越多的重视。本研究采用 NNG(非负绞杀)算法和 ARIMA(自回归积分滑动平均)校正方法,对混烧锅炉开发了一种数据驱动的建模与优化方法。

## 1 系统描述

锅炉的具体参数为:主蒸汽产生量 200 000 kg/h;主蒸汽温度 514 °C;主蒸汽压力 9.21 MPa;给水温度 190 °C。数据采集周期为 1 min,去掉非正常生产条件下的数据,取 15 000 笔数据供研究。该 15 000 笔数据中,主蒸汽流量的变化范围为 120 000 - 200 000 kg/h;主蒸汽温度的波动范围为 504 - 517 °C;主蒸汽压力的波动范围为 8.86 - 9.38 MPa;给水温度的波动范围为 184 - 193 °C。

BFG/Coal 混烧锅炉的相关输入变量可以分为 3 类:(1) 给水相关的变量:给水流量  $F_{fw}$  (kg/h)、省煤器前温度  $T_{fwa}$  (°C)、省煤器后温度  $T_{fwb}$  (°C) 和过热蒸汽压力  $P_{fw}$  (kg/cm<sup>2</sup>);(2) 燃料相关的变量:给煤流量  $F_{coal}$  (kg/h)、BFG 流量  $F_{BFG}$  (km<sup>3</sup>/h) 和 BFG 热值  $H_{BFG}$  (MJ/m<sup>3</sup>);(3) 空气相关的变量:空气流量  $F_{air}$  (%)。锅炉输出变量可以分为两类:(1) 主蒸汽相关变量:流量  $F_{st}$  (kg/h)、温度  $T_{st}$  (°C) 和压力  $P_{st}$  (kg/cm<sup>2</sup>);(2) 烟气相关变量:氧气浓度  $O_{FG}$  (%) 和一氧化碳浓度  $CO_{FG}$  (%)。

通常,煤的热值波动比较大,直接影响锅炉的热效率。本研究中由于煤的热值变动不大,所以是按常值来处理的。锅炉热效率为:

$$\eta = \frac{F_{st} \times (\text{主蒸汽热焓} - \text{给水热焓})}{F_{BFG} \times H_{BFG} + F_{coal} \times H_{coal}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $F_{st}$ —主蒸汽流量,kg/h;  $H_{coal}$ —煤的热值,kJ/kg。

收稿日期: 2013 - 11 - 06; 修订日期: 2014 - 01 - 05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61171145)

作者简介: 王建国(1972 -),男,山西文水人,上海大学副教授,博士。

## 2 模型输入变量分析与引入

### 2.1 派生变量引入与线性差别分析

锅炉蒸汽生产需要满足外部负荷的变化要求,与负荷直接相关的 4 个锅炉输入变量  $F_{fw}$ ,  $F_{air}$ ,  $F_{coal}$ ,  $F_{BFG}$ 。锅炉总的能量输入( $E_{in}$ )也是与负荷直接相关的。

为了减小负荷变化对热效率研究的影响,引入两个派生比例变量水燃比  $F_{fw}/E_{in}$ 和  $F_{fw}/E_{in}$ 和空燃比  $F_{air}/E_{in}$ 。另外,BFG 所提供能量在总能量中所占比重与效率是密切相关的,所以  $E_{BFG}/E_{in}$ ( $E_{BFG}$  输入的高炉煤气的能量)也应引入。去掉与负荷直接相关的 4 个锅炉输入变量,引入以上 3 个派生比例变量与其它输入变量一并对热效率进行建模。

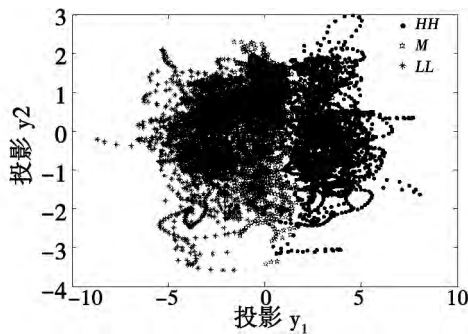


图 1 LDA 投影的分布

Fig. 1 Distribution of the LDA projection

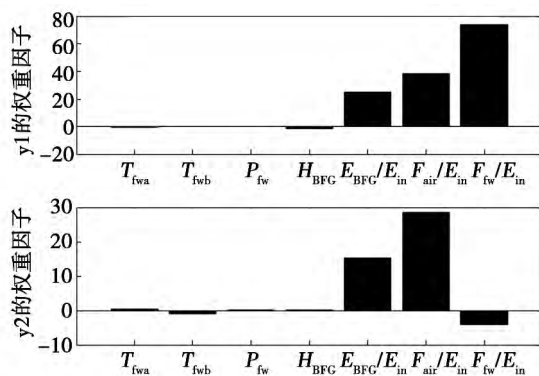


图 2 各输入变量的权重因子

Fig. 2 Weighting factors of various input variables

采用 LDA(线性判别分析)来检验 3 个派生变量对于不同热效率水平是否起到重要的作用。根据热效率值将所有数据分为 5 个等级,从高到低依次表示为 HH, H, M, L 和 LL。对其中 HH, M 和 LL 3

群数据进行线性判别分析, LDA 投影分布与构成  $y_1$  和  $y_2$  投影时各输入变量的权重因子分别如图 1 和图 2 所示。由图可见 3 群数据的 LDA 投影得到了明显区分, 3 个最重要的变量正是引入的 3 个派生变量。

### 2.2 $O_{FG}$ 引入与主成分分析

实际操作时烟气中氧气浓度  $O_{FG}$  经常作为热效率高低的一个重要指标,而  $O_{FG}$  与  $F_{air}/E_{in}$  是密切相关的,所以相关性分析用于探讨热效率与  $F_{air}/E_{in}$  和  $F_{air}/E_{in}$  和  $O_{FG}$  之间的关系。结果显示,热效率与  $F_{air}/E_{in}$  和  $F_{air}/E_{in}$  之间的相关度为 14.5%,而与  $F_{air}/E_{in}$  和  $O_{FG}$  之间的相关系数为 2.6%。但从经验可知,  $O_{FG}$  与热效率不应只有这么弱的关系。

采用 PCA(主成分分析)进一步探讨热效率与  $F_{air}/E_{in}$  和  $F_{air}/E_{in}$  和  $O_{FG}$  之间的关系。分析结果显示,  $F_{air}/E_{in}$  和  $O_{FG}$  的第一主成分可以解释  $F_{air}/E_{in}$  和  $O_{FG}$  77.05% 的变动,但对于热效率变动的解释度只有 1.5%。相比较而言,第二主成分虽然只能说明  $F_{air}/E_{in}$  和  $O_{FG}$  22.95% 的变动,但可以解释 32.3% 的热效率变动。结果表明,虽然  $O_{FG}$  与热效率的相关度很低,但  $O_{FG}$  和  $F_{air}/E_{in}$  的第二主成分与热效率成强相关关系。所以,  $O_{FG}$  也应引入热效率模型,则热效率模型可以表示为:

$$\eta = f(F_{fw}/E_{in}, F_{air}/E_{in}, E_{BFG}/E_{in}, T_{fwa}, T_{fwb}, P_{fw}, H_{BFG}, O_{FG}) \quad (2)$$

## 3 基于 NNG 和 ARIMA 的自适应建模

NNG 变量选择算法可以分为两步,第一步按照常规最小二乘方法得到一组回归系数,第二步求解一系列受约束的二次规划问题,对回归系数进行收缩,以实现变量选择的目的<sup>[2]</sup>。给定一组观测数据  $\{X, y\}$ ,  $X \in R^{n \times p_x}$  为输入矩阵,各列表示各输入变量,  $y \in R^{n \times 1}$  为输出响应变量。设  $\hat{\beta} \in R^{p_x \times 1}$  为以下线性模型系数的常规最小二乘估计,则:

$$y = X\hat{\beta} + \varepsilon \quad (3)$$

第二步收缩过程可以表示最优问题:

$$J = \min_{c_j} \sum_{i=1}^n (y_i - X_i c_j \times \hat{\beta})^2 \quad s.t. \quad c_j \geq 0, \quad \sum_{j=1}^{p_x} c_j \leq s \quad (4)$$

当减小  $s$  时,非负绞杀收缩强度增大,更多的  $c_j$  变为零,剩下的非零元素进一步得到收缩。在范围

$0 \leq s \leq p_x$  内 存在一个解集 ,最优解  $s^*$  可以通过交叉验证得到。最优的  $c^*$  可以求解以下最优问题:

$$c^* = \arg \min_{c_j} \sum_{i=1}^n (y_i - X_i c_j \times \hat{\beta})^2 \quad s. t. \quad c_j \geq 0, \sum_{j=1}^{p_x} c_j \leq s^* \quad (5)$$

NNG 回归系数可通过式(6)得到:

$$\hat{\beta}_{NNG} = c^* \cdot \hat{\beta} \quad (6)$$

给定  $k$  时刻模型输入数据  $X_k$  输出预测值可以表示为:

$$\hat{y}_k = X_k \hat{\beta}_{NNG} \quad (7)$$

NNG 模型的预测精度对于通常的应用是满足要求的 ,但对于热效率研究 ,其精度需要进一步提高。对效率和  $O_{FG}$  的 NNG 预测误差(表示为  $a_k = y_k - \hat{y}_k$ ) 进行时间序列分析发现 , $a_k$  和  $a_{k-1}$  之间具有高度相关性 ,且模型预测误差序列具有非平稳特性 ,所以引入 ARIMA(1,1,1) 模型用于提高模型精度:

$$y_k = \hat{y}_k + a_k \quad a_k = \frac{1 - \theta B}{(1 - \varphi B)(1 - B)} \varepsilon_k \quad (8)$$

式中:  $B$ —延迟算子;  $\varepsilon_k$ —方差为  $\delta^2$  的零均值正态分布白噪声;  $\theta$ 、 $\varphi$ —待辨识的系数 ,可以变换得到:

$$\begin{aligned} \hat{a}_k &= y_k - \hat{y}_k \\ \hat{\varepsilon}_k &= \hat{a}_k - (1 + \varphi) \hat{a}_{k-1} + \varphi \hat{a}_{k-2} + \theta \hat{\varepsilon}_{k-1} \end{aligned}$$

给定数据长度为  $n$  的实际值  $y$  和 NNG 模型预测值  $\hat{y}$  ,系数  $\theta$  和  $\varphi$  可通过最小化目标函数进行辨识。

$$\min_{\theta, \varphi} \sum_{k=1}^n \hat{\varepsilon}_k^2 \quad (9)$$

获得 ARIMA(1,1,1) 模型后 ,新的预测值为:

$$y_k = \hat{y}_k + (1 + \varphi) a_{k-1} - \varphi a_{k-2} - \theta \varepsilon_{k-1} \quad (10)$$

#### 4 热效率和 $O_{FG}$ 建模与预测

由于锅炉系统的特性是不断变化的 ,所以本研究中以移动时窗的形式来进行自适应建模。设置观测和预测时窗长度分别为 5 000 和 500 ,所以共有 20 个观测时窗和 20 个预测时窗。采用 NNG 回归和 ARIMA 校正自适应方法对热效率进行建模与预测。建模过程中 8 个变量在 20 个预测时窗中 NNG 回归系数 ,如图 3 所示。计算得到 模型预测均方根误差为 0.56%。

然而 ,此预测精度对于基于模型的锅炉热效率

研究还是不够的。为了进一步提高模型精确 ,引入 ARIMA(1,1,1) 模型进行动态校正 ,所得模型的预测均方根误差变为 0.028%。如式(2)所示 , $O_{FG}$  是热效率模型的输入变量 ,所以  $O_{FG}$  模型为:

$$O_{FG} = g\left(\frac{F_{air}}{E_{in}}, \frac{F_{fw}}{E_{in}}, \frac{E_{BFG}}{E_{in}}, T_{fwa}, T_{fwb}, P_{fw}, H_{BFG}\right) \quad (13)$$

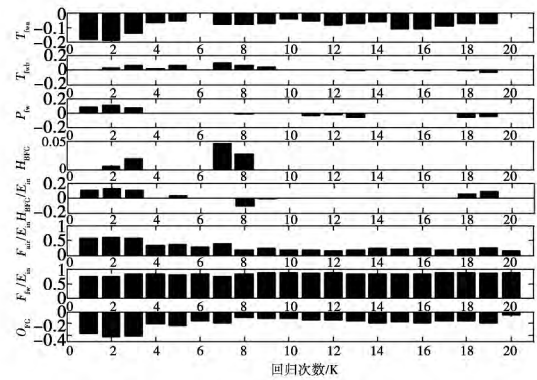


图 3 NNG 回归系数

Fig. 3 NNG regression coefficients

结果显示 , $O_{FG}$  的 NNG 回归模型中  $F_{air}/E_{in}$  的回归系数全部为正 ,这与增加空气供给会导致  $O_{FG}$  升高的现象是一致的。注意图 3 热效率的 NNG 回归模型中  $F_{air}/E_{in}$  的回归系数也全部为正 ,而  $O_{FG}$  的系数也全部为负 ,表明增大  $O_{FG}$  ,则锅炉效率降低。所以 ,增大  $F_{air}/E_{in}$  提升锅炉效率是受到制约的 ,增大  $F_{air}/E_{in}$  将会导致更高的  $O_{FG}$  ,这样过多地增加空气供给量会导致烟气带走更多的热能 ,从而使热效率降低。可见 ,回归系数的正负号具有明确的物理意义 ,与实际操作是一致的。

#### 5 基于模型的优化操作

采用的调节策略中取相应实际操作数据的最大和最小值 ,做为调节上界和下界。调节策略表示为:

$$\max_{\frac{F_{air}}{E_{in}}} \eta \left( \frac{F_{air}}{E_{in}}, \frac{F_{fw}}{E_{in}}, \frac{E_{BFG}}{E_{in}}, T_{fwa}, T_{fwb}, P_{fw}, H_{BFG}, O_{FG} \right)$$

s. t.

$$O_{FG} = g\left(\frac{F_{air}}{E_{in}}, \frac{F_{fw}}{E_{in}}, \frac{E_{BFG}}{E_{in}}, T_{fwa}, T_{fwb}, P_{fw}, H_{BFG}\right)$$

$$\frac{F_{air}}{E_{in \min}} \leq \frac{F_{air}}{E_{in}} \leq \frac{F_{air}}{E_{in \max}}, O_{FG \min} \leq O_{FG} \leq O_{FG \max}$$

$$(14)$$

以相同的移动时窗形式,采用以上效率调节策略确定最优的操作量。时域[5 001 15 000]内的效率基于模型进行最优调节,各变量的调节结果如图4所示。图4中,原始的操作曲线标记为实线,调整后的曲线及相应的效率提升量标记为虚线。由实际操作曲线可见,燃料中BFG所占比例增大,则 $F_{\text{air}}/E_{\text{in}}$ 减小,这一趋势与燃烧理论是一致的。等量热能单位的燃料,煤比BFG需要更多的空气量以实现完全燃烧。

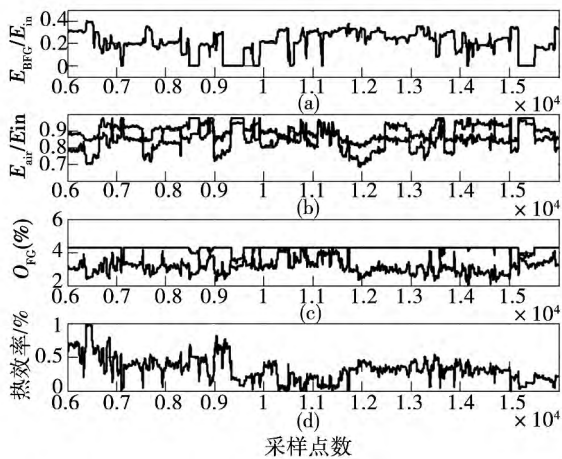


图4 效率调整结果

Fig. 4 Efficiency adjustment results

比较 $F_{\text{air}}/E_{\text{in}}$ 实际值与调整值可见,锅炉操作人员所做的操作是正确的,但是没有达到最优的空气

供给量。结果显示,整个时域都需要增加空气供给以提高热效率,特别是在燃料中含有更多BFG燃料成分的情况下。统计结果为, $F_{\text{air}}/E_{\text{in}}$ 的平均调高量为8.73%,热效率的平均提升量为0.32%。

## 6 结论

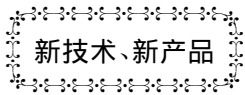
基于混烧锅炉实际操作数据,研究了一种数据驱动的热效率建模与优化操作方法,得出结论:

- (1) 在建模过程中,通过LDA和PCA分析,引入了具有明确物理意义的3个派生变量;
- (2) 利用NNG变量选择和ARIMA校正的方法对热效率进行建模,模型预测均方根误差达到0.028%;
- (3) 研究结果显示,采用基于模型的优化操作策略具有较大的节能空间,热效率平均提升量为0.32%。

## 参考文献:

- [1] Shieh S S, Chang Y H, Jang S S, et al. Statistical key variable analysis and model-based control for the improvement of thermal efficiency of a multi-fuel boiler [J]. Fuel, 2011, 89 (5): 1141-1149.
- [2] Breiman L. Better subset regression using the nonnegative garrote [J]. Technometrics, 1995, 37(4): 373-384.

(丛敏 编辑)



## 在近实际条件下斯特林发动机效率研究

据《Энергетика》2013年5-6月刊报道,亚美尼亚国立工程大学的学者研究了斯特林发动机近实际条件下的效率,并尝试考虑与热交换有限值有关的热量回收损失。在工质为范德华尔斯气体的条件下,得到在无回热器和有回热器情况下斯特林发动机的绝对内效率。结果表明,在考虑分子体积情况下,斯特林发动机的热效率取决于工质的克分子数并且比理想气体稍有增加。同时,考虑了斯特林发动机在热量与回收情况下的运行热损失,得到了回热度与热交换时间的相互关系。

(吉桂明 摘译)

数据驱动的 BFG/Coal 混烧锅炉热效率建模与优化操作 = **Thermal Efficiency Modeling of a BFG( Blast Furnace Gas) /Coal Blended Combustion Boiler Driven by Data and Its Optimized Operation** [刊, 汉]

WANG Jian-guo ,CHENG Hua-li ,XIAO Qian-ping ,MA Shi-wei ( Shanghai Key Laboratory on Power Plant Automation Technology ,College of Electromechanical Engineering and Automation ,Shanghai University ,Shanghai ,China , Post Code: 200072) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29( 5) . -544 -548

Based on the practical data for operation ,put forward was tactics for thermal efficiency modeling of a blended combustion boiler driven by data and its optimized operations. Firstly ,the process input variables were converted into three derivative variables of physical statistical significance. Then ,the non-negative garrote ( NNG) variable selective algorithm and the self-regressive integral moving average ( ARIMA) correction algorithm were introduced and a self-adaptive modeling method was given. Finally ,the tactics for optimizing the operation of blended combustion boilers based on the model in question was put forward and used for optimization of operation of boilers. It has been found that the blended combustion boilers using the tactics for optimizing the operation based on the model enjoy a relatively big energy-saving space and the average increase of the thermal efficiency is 0. 32% . **Key Words:** multi-fuel boiler ,thermal efficiency ,non-negative garrote ( NNG) ,variable selection ,data driving

DBEL 型 W 火焰锅炉燃尽风喷口设计 = **Design of the OFA ( Over-fired Air) Spout of a DBEL( Doosan Babcock Energy Limited ) Type W-shaped Flame Boiler** [刊, 汉]

HAN Hai-yan ,LIU Peng-yuan ( Huadian Electric Power Science Research Institute ,Hangzhou ,China ,Post Code: 310030) ,LI Tong-ce ( Guizhou Wujiang Hydropower Development Co. Ltd. ,Guiyang ,China ,Post Code: 550002) ,REN Xiao-han ( National Key Laboratory on Coal-fired Pollutant Emissions Reduction Engineering ,College of Energy Science and Engineering ,Harbin Institute of Technology ,Harbin ,China ,Post Code: 150001) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 , 29( 5) . -548 -553

The W-shaped flame boiler technology developed by Doosan Babcock Co. Ltd. makes it impossible to set up a separate regulation device to regulate the swirling intensity at the OFA spout forming an once-through flow inside and swirling flow outside due to the restriction of such factors as the structure of the boilers and the location of the air box and in such a case a higher requirement is set for the design of the structure of the OFA spout. By utilizing the cold-state modeling test and the CFD numerical simulation software ,the authors obtained the resistance and flow characteristics of the OFA spout ,making the OFA to match with the thermal process of the boilers and realize the aim of enclosing the mainstream flue gases and securing the combustion efficiency. The application results show that when the inclusive angle of the blades and the axial line is  $25^{\circ}$  to  $30^{\circ}$  ,the rotating momentum torque of the jet flow