

电站锅炉参数数据分析

刘焕章, 刘吉臻, 常太华, 袁桂丽
(华北电力大学自动化系, 北京 102206)

摘要: 在当前的电力生产过程中, 受到关注的不仅仅局限于以往的经济性和稳定性, 环保性也有着举足轻重的地位。将以数据分析为主要手段, 通过对采集的大量数据的处理, 确定作为输入的燃料量和给风量与机组的负荷以及烟气中各种成分的含量之间的统计规律, 实现了通过燃料量、给风量和负荷对烟气成分的间接测量, 为实时的排放绩效考查提供有价值的烟气参考值。

关键词: 电站锅炉; 烟气成分; 负荷; 数据分析; 排放绩效

中图分类号: TK224 文献标识码: A

引 言

排放绩效是美国弗蒙特州的一个公共服务委员会 1996 年提出的以产出为基础的一个建议, 该建议被州的法律重组委员会采纳, 并在美国的东北各州引起了广泛的关注; 1997 年马萨诸塞州首先通过包含排放绩效条款的法律; 1998 年康涅狄格州要求修订相关法律; 1999 年新泽西州通过类似法律; 并最终在东北州大气协同管理组织的范围内形成了《NESCAUM 示范规则》。

我国在新修订的火电厂大气污染物排放标准 (GB13223-2003) 中引入了排放绩效的理念^[1-3], 火电厂生产过程的环保性得到了前所未有的重视。本文将通过对采集自电厂生产过程的数据进行相关性分析以及曲线逼近拟合, 得到锅炉排放出的烟气中的各成分之间以及它们与燃料量、给风量以及负荷之间的关系矩阵, 并通过验证数据说明该矩阵的泛化能力。获得该关系矩阵的目的在于可以为排放绩效考查提供有价值的的数据或参数预测。

1 数据分析原理

1.1 相关性分析的原理^[3]

相关性系数用下式表示:

$$\rho = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{D(X) \cdot D(Y)}} \quad (1)$$

式中: $D(X)$ 、 $D(Y)$ —变量 X 、 Y 的方差; $\text{cov}(X, Y)$ —变量 X 、 Y 的相关系数, 它的计算如下:

$$\text{cov}(X, Y) = E[X - E(X)] \cdot E[Y - E(Y)] \quad (2)$$

式中: $E(X)$ 、 $E(Y)$ —变量 X 、 Y 的数学期望。

任意一个变量 X 的数学期望和方差的定义如下: 若 X 是离散变量, 其概率分布为 $p_i = p\{X = x_i, i = 1, 2, 3, \dots\}$, 如级数 $\sum x_i p_i$ 收敛, 则将 $E(X) = \sum x_i p_i$ 称为变量 X 的数学期望; 若 X 是连续变量, $f(x)$ 为其概率密度函数, 如 $\int x f(x)$ 存在, 则 $E(x) = \int x f(x)$ 为变量 X 的数学期望; 若对于变量 X , $E[X - E(X)]^2$ 同样存在, 则称 $D(X) = E[X - E(X)]^2$ 为变量 X 的方差。

1.2 曲线拟合的最小二乘法原理^[4]

设 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3) \dots (x_n, y_n)$ 为 $n+1$ 个待拟合的点, 设 $a = \min(x_i)$ 、 $b = \max(x_i)$, 在 $[a, b]$ 区间上选定线性无关函数 $\{\varphi_1(x), \varphi_2(x) \dots \varphi_k(x)\}$, 在空间 $\Phi = \text{span}\{\varphi_1(x), \varphi_2(x) \dots \varphi_k(x)\}$ 中寻求一个函数 $S(x) = \sum a_i \varphi_i(x)$, 求满足 $\|S(x_i) - y_i\|^2$ 最小的函数 $S(x)$ 即为 $n+1$ 个待拟合的点的^{最小二乘法拟合函数}。

上述问题可以转化为求解如下线性方程组:

$$\begin{bmatrix} (\varphi_0, \varphi_0) & (\varphi_1, \varphi_0) & \dots & (\varphi_k, \varphi_0) \\ (\varphi_0, \varphi_1) & (\varphi_1, \varphi_1) & \dots & (\varphi_k, \varphi_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (\varphi_0, \varphi_k) & (\varphi_1, \varphi_k) & \dots & (\varphi_k, \varphi_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (y_0, \varphi_0) \\ (y_1, \varphi_1) \\ \vdots \\ (y_k, \varphi_k) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\begin{cases} (\varphi_j, \varphi_l) = \sum \omega(x_i) \varphi_j(x_i) \varphi_l(x_i) \\ (y_i, \varphi_l) = \sum \omega(x_i) y_i \varphi_l(x_i) \end{cases}$, $\omega(x_i)$ 为非负数即 $\omega(x_i) \geq 0$, 表示对 (x_i, y_i) 进行的重复测量的次数。

2 eDNA 数据分析

应用上述原理, 对取自盘山电厂 3 号机组的数据进行分析, 该装机容量为 600 MW; 制粉系统采用北京电力设备总厂生产的 ZGM-123 中速辊式磨煤机, 采用直吹式进粉方式; 送风机采用上海鼓风机厂生产的 FAF26.6-12.6-1 动叶调节轴流式鼓风机, 引风机采用 HOWDEN 生产的 ANN-3600/2000B 动叶调节轴流式引风机。

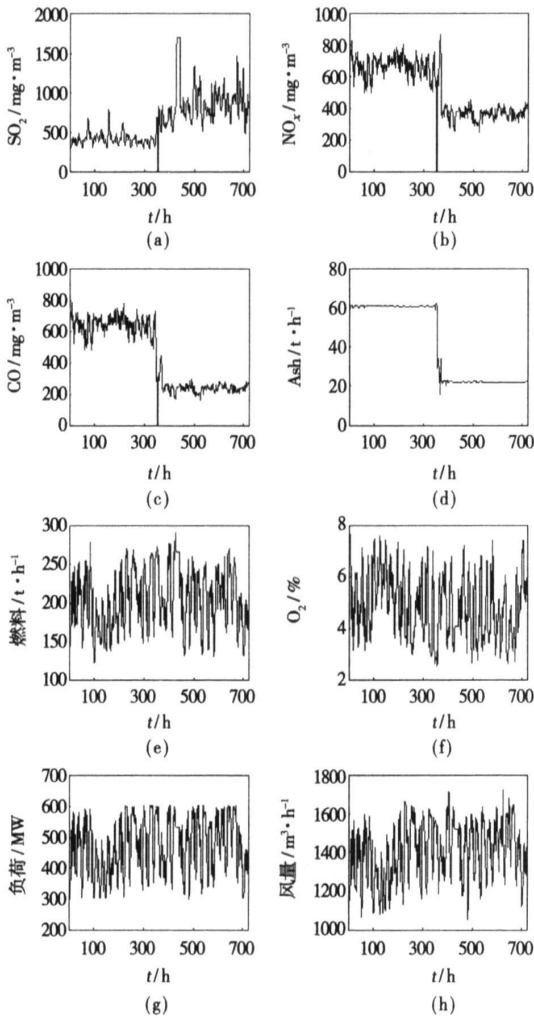


图 1 eDNA 数据

图 1 是从数据库中取得的机组一个月的运行数据, 对其进行相关性分析, 得到它们之间的相关性系数矩阵为:

	SO_2	NO_x	CO	dust	fuel	O_2	power	air
SO_2	1.00	-0.69	-0.74	-0.76	0.30	-0.36	0.33	0.34
NO_x	-0.69	1.00	0.96	0.87	-0.26	0.34	-0.31	-0.35
CO	-0.74	0.96	1.00	0.94	-0.22	0.30	-0.26	-0.31
dust	-0.76	0.87	0.94	1.00	-0.11	0.18	-0.14	-0.22
fuel	0.30	-0.26	-0.22	-0.11	1.00	-0.91	0.96	0.94
O_2	-0.36	0.34	0.30	0.18	-0.91	1.00	-0.97	-0.88
power	0.33	-0.31	-0.26	-0.14	0.96	-0.97	1.00	0.96
air	0.34	-0.35	-0.31	-0.22	0.94	-0.88	0.96	1.00

观察上述相关性系数矩阵中的元素的特征, 并将上面的矩阵分块为:

$$\begin{bmatrix} A_{2 \times 2} & B_{2 \times 2} \\ C_{2 \times 2} & D_{2 \times 2} \end{bmatrix}$$

可以看出矩阵 $A_{2 \times 2}$ 表示二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳和灰尘之间的相关性系数, 即线性相依的关系; 而 $D_{2 \times 2}$ 表示燃料量、氧量、负荷和给风量之间的相关性系数; 而 $B_{2 \times 2}$ 和 $C_{2 \times 2}$ 则表示前四者与后四者之间的分别相关性系数。由于相关性系数矩阵自身的对称性, 使得 $A_{2 \times 2} = A_{2 \times 2}^T, D_{2 \times 2} = D_{2 \times 2}^T, B_{2 \times 2} = C_{2 \times 2}^T$ 成立。

通过观察可以看到, 矩阵 $A_{2 \times 2}$ 和 $D_{2 \times 2}$ 中的每个元素都比较大, 而 $B_{2 \times 2}$ 和 $C_{2 \times 2}$ 的每个元素都比较小, 这说明前四者和后四者都分别跟自己内部的线性相依程度大, 而前四者跟后四者之间则线性相依程度小。

根据 $A_{2 \times 2}$ 矩阵的第一行进行线性拟合, 可得到:

$$\begin{cases} \hat{q}_1(NO_x) = -0.3919 \hat{\alpha}(SO_2) + 770.0093 \\ \hat{q}_1(CO) = -0.5180 \hat{\alpha}(SO_2) + 764.9431 \\ \hat{q}_1(Ash) = -0.0500 \hat{\alpha}(SO_2) + 73.0655 \end{cases} \quad (4)$$

根据 $A_{2 \times 2}$ 矩阵的第二行进行线性拟合, 可得到:

$$\begin{cases} \hat{q}_2(SO_2) = -1.2291 \hat{\alpha}(NO_x) + 1277.2617 \\ \hat{q}_2(CO) = 1.1973 \hat{\alpha}(NO_x) - 188.1043 \\ \hat{q}_2(Ash) = 0.1005 \hat{\alpha}(NO_x) - 11.0967 \end{cases} \quad (5)$$

根据 $A_{2 \times 2}$ 矩阵的第三行进行线性拟合, 可得到:

$$\begin{cases} \hat{q}_3(SO_2) = -1.0460 \hat{\alpha}(CO) + 1092.5680 \\ \hat{q}_3(NO_x) = 0.7709 \hat{\alpha}(CO) + 185.0523 \\ \hat{q}_3(Ash) = 0.0877 \hat{\alpha}(CO) + 3.0895 \end{cases} \quad (6)$$

根据 $A_{2 \times 2}$ 矩阵的第四行进行线性拟合, 可得到:

$$\begin{cases} \hat{q}_4(SO_2) = -11.7053 \hat{\alpha}(Ash) + 1120.1161 \\ \hat{q}_4(NO_x) = 7.5067 \hat{\alpha}(Ash) + 210.8604 \\ \hat{q}_4(CO) = 10.1671 \hat{\alpha}(Ash) + 15.8084 \end{cases} \quad (7)$$

由此分别得到了关于二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳和灰尘的 3 个预测量。根据多传感器理论^[5-9]可知,对于同一参数,获得的多个测量值可以用如下方法处理:

$$X = \frac{\sum \frac{1/D(X_i)}{\sum \frac{1}{D(X_i)}} X_i}{\sum \frac{1}{D(X_i)}} \quad (8)$$

根据式(8)分别得到二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳和灰尘的预测结果,如图 2 所示。

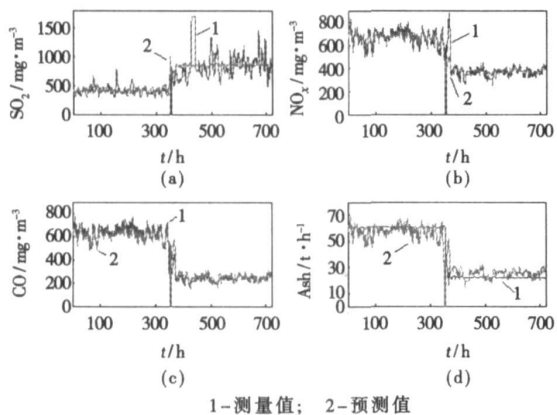


图 2 预测值与测量值比较一

从图 2 中可以看出(b)和(c)两图的预测效果较好,而(a)、(d)较差。因此采用(b)和(c)的预测,通过式(8)并消去已知量可以得到:

$$\begin{cases} \delta(\text{NO}_x) = -0.0969 \delta(\text{SO}_2) + 4.6788 \delta(\text{Ash}) + 356.2768 \\ \delta(\text{CO}) = -0.1433 \delta(\text{SO}_2) + 7.5131 \delta(\text{Ash}) + 320.5316 \end{cases} \quad (9)$$

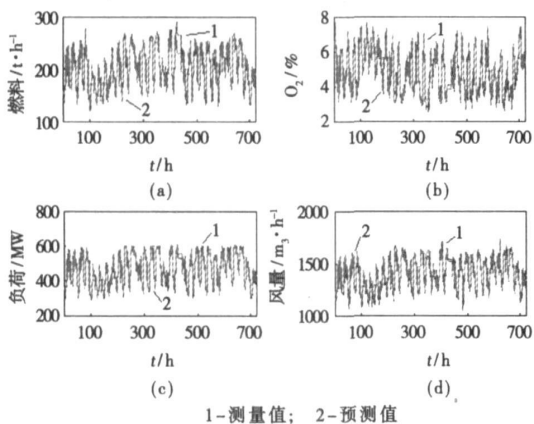


图 3 预测值与测量值比较二

从图 3 中可以看出,各图均有较为理想的预测效果。这里选用最容易得到的参数——负荷作为输入,

来预测其它量,根据式(8)并消去已知量可以得到:

$$\begin{cases} \delta(\text{fuel}) = 0.4093 \delta(\text{power}) + 11.5089 \\ \delta(\text{O}_2) = -0.0132 \delta(\text{power}) + 11.0573 \\ \delta(\text{air}) = 1.5942 \delta(\text{power}) + 654.5660 \end{cases} \quad (10)$$

这样联立式(9)和式(10),就得到了 5 个预测方程,也就是说通过这些方程,原先需要检测的 8 个参数,现在仅需要其中的 3 个,就可以实现对其它参数的预测:

$$\begin{bmatrix} \delta(\text{NO}_x) \\ \delta(\text{CO}) \\ \delta(\text{fuel}) \\ \delta(\text{O}_2) \\ \delta(\text{air}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0969 & 4.6788 & 0 \\ -0.1433 & 7.5131 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4093 \\ 0 & 0 & -0.0132 \\ 0 & 0 & 1.5942 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \delta(\text{SO}_2) \\ \delta(\text{Ash}) \\ \delta(\text{power}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 356.2768 \\ 320.5316 \\ 11.5089 \\ 11.0573 \\ 654.5660 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3 数据验证

通过对一个月的数据分析,得到了预测方程,并取另一个月的数据对式(11)进行验证。

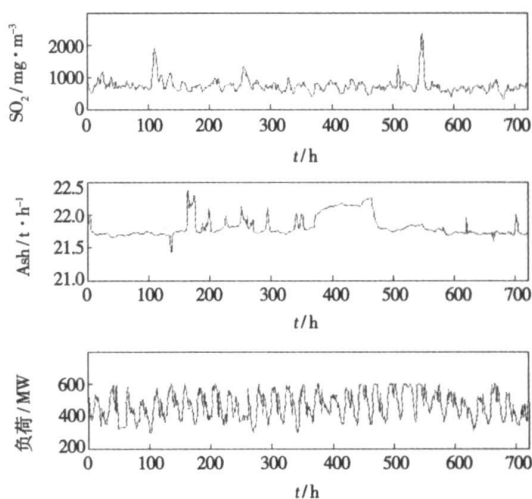


图 4 验证试验数据

利用式(11)对其它参数进行预测,结果如图 5 所示。

由图可以看出,式(11)对 5 个被预测的参数均有较好的效果。各预测值与相应的测量值吻合度很高。这说明式(11)具有较强的泛化能力。

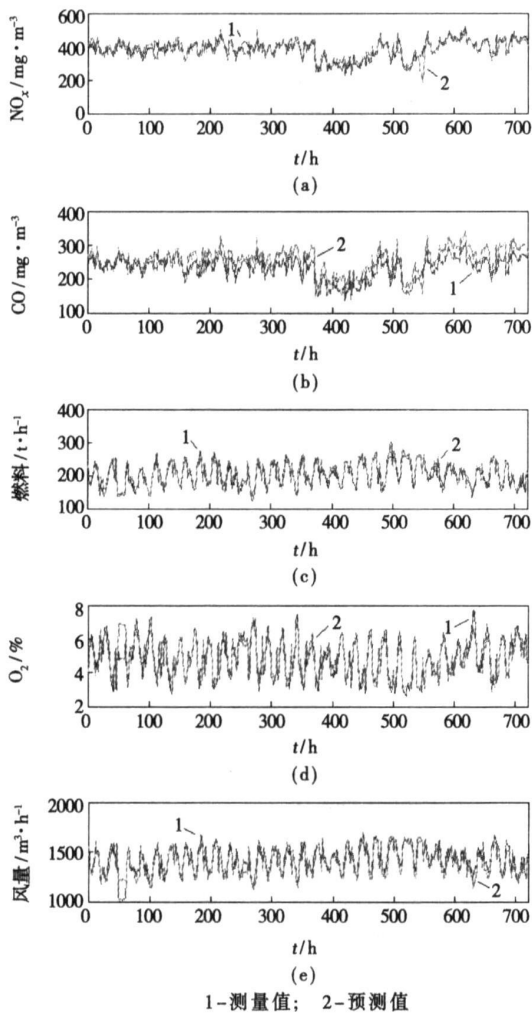


图 5 验证试验预测值与测量值比较

4 讨 论

电站锅炉的燃烧过程是一个复杂的非线性过程,但燃烧的产物之间由于其产生机理的关联,使其产生了线性相关的可能,比如:从定性来看,排烟氧量的升高,意味着空气过量系数大,燃烧充分,排烟中一氧化碳就会降低,同时由于氧的丰富,导致了氮元素的被氧化程度加大,从而使氮氧化物的含量升高;反之亦然。

同时我们注意到,燃烧过程的非线性,并非都是本质的。比如氧量与负荷之间有着很强的负线性相关,但实际运行过程中,由于操作人员的经验差异,在风煤协调中出现细微差别,使得氧量与负荷之间出现非线性特征。因此如能通过统计规律找出其线性的本质,反而能剔出由于操作人员的人为因素导致的对象表现特征的偏差。本文通过线性描述烟气成分之间的关系,不仅方便于工程实现,还可以更清

晰的认识燃烧过程。

5 结 论

从排放绩效的角度来看,电站可以看作是一个以燃料量和给风量为输入,以负荷以及含有各种大气污染物的烟气为输出的一个对象。本文通过对采集到的电站锅炉运行数据进行数学处理,得到了一个基于统计规律的输入输出之间的线性方程组,并通过验证数据说明了该方程组的适应能力。实现了由 3 个参数(烟气中二氧化硫、灰尘和负荷)预测其它 5 个参数(烟气中氮氧化物、一氧化碳、燃料量、空气预热器入口氧量和风量)的计算。该方法能够为对仪器要求严格的烟气测量提供一个软测量传感器,为绩效考察提供有价值的烟气信息。

参考文献:

- [1] GB13223-2003 火电厂大气污染物排放标准[S].
- [2] 段 宁,柴发合,陈义珍,等.《火电厂大气污染物排放标准》与火电厂大气污染控制[J].中国能源,2004,26(12):20-24.
- [3] 苏德矿,张继昌.概率论与数理统计[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [4] 翟瑞彩,谢伟松.数值分析[M].天津:天津大学出版社,2001.
- [5] 杨万海.多传感器数据融合及其应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004.
- [6] 康耀红.数据融合理论与应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,1997.

(编辑 滨)

· 书 讯 ·

《火力发电厂热工 自动控制实用技术》

本书面向火电厂热工自动控制的工程实际应用,阐述了火电机组汽包锅炉给水控制系统、汽包锅炉汽温控制系统、汽包锅炉燃烧自动控制系统、循环流化床锅炉控制系统、汽轮机数字电液控制系统、协调控制系统、机组一次调频以及机组 RB 技术的工程设计、调试、试验以及日常运行维护等内容,另外还简要介绍了热工自动控制的基础知识。

读者对象:火电厂热工自动控制专业设计、调试、运行及检修人员。

2007 年 4 月出版。

concluded that the ratio of fouling thermal resistances of cooling water in the practical operation of a bare tube and spiral-grooved one will be linearly increased with an increase in the product of the area index and efficiency index. However, the linear function expressions in the two zones ($p/e > 5.0$ and $p/e < 5.0$) are different. The particulate fouling ratio assumes a linear ascending relationship with an increase of the efficiency index within only one zone during the experiment.

Key words: bare tube, spiral-grooved tube, fouling characteristics, cooling water, linear relationship

电站锅炉强化传热管沾污特性试验研究 = **Experimental Study of the Fouling Characteristics of Intensified Heat Transfer Tubes of a Utility Boiler** [刊, 汉] / JING Yuan-zhuo, DONG Lei, QIANG Ning (Jinan Baichuan Tongchuang Industrial Co. Ltd., Jinan, China, Post Code: 250101), DONG Yu-ping (College of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 170 ~ 173

Fouling characteristics pertain to important parameters in the design calculation of boilers. Through a test rig set up in the flue of a coal-fired utility boiler, a hot state test of the fouling characteristics of spiral-finned tube bundles has been performed. A fitting correlation formula for the fouling factor, effective thermal coefficient and flue gas speed of spiral-finned tube bundles at different relative pitch values in the different transversal and longitudinal directions has been obtained. The test results show that the value of the fouling factor of spiral-finned tube bundles is an order of magnitude lower than that obtained from “Standard method for thermodynamic calculation of boilers” and the results can be used for the design of boiler heating surfaces and the analysis of their operation. **Key words:** boiler design, fouling characteristics, spiral-finned tube bundle, fouling factor, effective thermal coefficient

电站锅炉参数数据分析 = **Data Analysis of Utility Boiler Parameters** [刊, 汉] / LIU Huan-zhang, LIU Ji-zhen, CHANG Tai-hua, et al (Automation Department, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 174 ~ 177

In the currently prevailing power-generation process, what attracts attention is no longer limited only to the cost-effectiveness and stability emphasized in the past. Environment protection also plays a decisive role. The authors have taken data analysis as the main method to identify the statistical law governing the relationship among the amount of fuel and air input, load of a turbo-generator unit and the content of various constituents in flue gases, thus realizing an indirect measurement of flue gas constituents through the measurement of fuel and air input as well as plant load. The foregoing can well provide valuable flue-gas reference values for a real-time check and inspection of emissions-compliance performance. **Key words:** utility boiler, flue gas constituent, load, data analysis, emissions performance

基于混沌理论的预测 PID 控制器参数优化研究 = **A Study of the Prediction of Parameter Optimization of a PID Controller Based on Chaotic Theory** [刊, 汉] / MING Xue-xing, WANG Jian-guo, LU Zhen-zhong, et al (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(2). — 178 ~ 182

Realistic industrial processes frequently suffer from an external interference, and tend to assume slow and time-variation features, making it difficult for a traditional PID (proportional-integral-differential) controller to timely track the changes of a system and overcome noise interference. The authors have studied the application of chaos-based optimization theory