

灰色软测量在球磨机料位检测中的应用

苏志刚, 于向军, 吕震中, 赵 刚

(东南大学 动力系, 江苏 南京 210096)

摘 要: 火力发电厂锅炉制粉系统的主要设备之一——球磨机的运行状况优劣在一定程度上决定了电厂的经济运行好坏, 本文将非线性 PLS 回归方法与灰色一致相关理论相结合用于球磨机料位的软测量, 通过对球磨机筒内料位的监测来控制给煤机转速以使球磨机处于最佳运行工况, 从而获得最小制粉单耗。工程应用结果表明, 该软测量方法具有较高的估计精度, 可满足实际需要, 解决了由于安全保守运行而导致磨长期低负荷运行的不经济状况。

关 键 词: 球磨机; 料位; 灰色软测量; 一致关联度; 非线性 PLS

中图分类号: TK223.7 文献标识码: A

1 引 言

目前我国电厂锅炉制粉系统相当一部分配备了低速钢球磨煤机, 采用中间仓储式结构, 但该系统绝大部分未能达到经济工况运行, 原因之一是磨内负荷难以直接测量^[1]。因此, 解决磨内负荷的测量问题不论对于其控制还是经济运行和监测均具有十分重要的意义。

近年来, 对球磨机筒内负荷的检测提出了居多方法, 如差压法、功率法、轴承振动法等。由于球磨机的负荷不可直接检测且对其影响的因素很多, 本文提出“料位”的概念, 用料位来代替磨负荷, 并运用灰色关联理论对影响料位的各辅助变量进行选择, 用非线性 PLS 作为球磨机筒内料位软测量方法。通过对影响料位的各辅助变量的在线检测以实现料位的软测量, 从而实现球磨机的最佳工况运行。

2 球磨机料位定义

定义球磨机的料位为: 球磨机内煤的体积与减去钢球所占容积后磨煤机的容积之比(%), 其数学表达式为:

$$\text{Fill-level} = \frac{M_m / \rho_m}{V - M_{g1} / \rho_{g1}} \quad (1)$$

其中: Fill-level—料位; M_m —筒内存煤量, kg; ρ_m —球磨机中煤的密度, kg/m^3 ; V —球磨机筒内容积, m^3 ; M_{g1} —钢球装载量, kg; ρ_{g1} —钢球本身的密度, kg/m^3 。

稳态下磨筒内的料位计算公式为:

$$B_m = B_0 \cdot K_m \cdot K_{mm} \cdot K_f \cdot K_d \quad (2a)$$

$$K_m = \frac{2.1}{1 + e^{-((t_m - 5)/30)^2}} - 1.05 \quad (2b)$$

$$K_{mm} = K_1 \cdot \frac{M_m}{M_{m, \max}} - K_2 \cdot \left(\frac{M_m}{M_{m, \max}} \right) \quad (2c)$$

$$M_{m, \max} = \lambda (V - M_{gq} / \rho_{gq}) \rho_m \quad (2d)$$

由式(1)、式(2-c)及式(2-d)可得下式:

$$K_{mm} = K_1 (L / \lambda) - K_2 (L / \lambda)^2 \quad (2e)$$

由式(2-a)、式(2-b)及式(2-e)可得下式:

$$\begin{aligned} & K_1 (L / \lambda) - K_2 (L / \lambda)^2 \\ & = K_{mm} = B_m \left\{ B_0 \cdot K_f \cdot K_d \left(\frac{2.1}{1 + e^{-((t_m - 5)/30)^2}} - 1.05 \right) \right\} \end{aligned} \quad (2f)$$

其中: L —稳态料位值, $K_1 = 2, K_2 = 1$; B_0 —磨煤机计算出力, t/h ; K_{mm} —筒内存煤量对磨出力影响的修正系数; B_m —磨出力, t/h ; K_m —磨出口温度对磨出力影响的修正系数; K_f —通风量对磨出力影响的修正系数; K_d —粗粉分离器折向门开度对磨出力影响的修正系数; t_m —磨煤机出口(风、粉)温度, $^{\circ}\text{C}$; M_m —存煤量, kg; $M_{m, \max}$ —球磨机最大容许存煤量; λ —修正系数, 且 $0 < \lambda < 1$, 本文取 0.85, 即料位值为 85% 时即为磨最大存煤状态。

从式(1)可以看出存煤量和料位的关系: 存煤量直接表示磨筒内贮存的煤量, 料位则更能综合反映影响球磨机出力的磨筒内钢球装载量与存煤量的相对关系与特性, 在实际运行过程中可表征磨负荷的高低; 式(2)则用于获得稳态时磨料位的样本值。

收稿日期: 2005-10-12; 修订日期: 2006-04-27

作者简介: 苏志刚(1979-)男, 湖北武穴人, 东南大学博士研究生。

3 灰色关联分析及辅助变量的选择

3.1 一致灰关联方法提出

灰色关联分析是灰色理论的基本内容, 它与传统的相似性分析方法, 如相关系数法等相比, 具有简单、直观和计算量小的特点。同时它对样本量的大小没有过高的要求, 不需要典型的分布规律, 而且其定量分析的结果与定性分析的结果一般能够吻合, 所以, 在对存在不确定性知识的灰色系统进行分析时, 它具有不可比拟的优越性能。灰色关联分析的基本思想是根据曲线间相似程度来判断因素间的关联程度。灰关联度描述了系统发展过程中因素间相对变化的情况。根据序列之间的关联程度的大小, 可以定量判断两序列之间的关联性, 而且, 应用关联矩阵还可以进行多因素情况下的优势分析。

为避免产生分析结果与实际不符的问题, 本文提出一致关联度法。该方法不仅克服了以上各方法存在的问题, 还考虑了不同变量的变化率的差异对相关性的影响, 一致关联度法算法为:

$$\mu_{ij} = 1 \left\{ 1 + \left| \frac{|\Delta x_i(k)|}{\bar{\Delta}_i} - \frac{|\Delta x_j(k)|}{\bar{\Delta}_j} \right| \right\} \quad (3)$$

$$\Delta x_j(k) = x_j(k+1) - x_j(k) \quad (4)$$

$$\Delta x_i(k) = x_i(k+1) - x_i(k) \quad (5)$$

$$\bar{\Delta}_z = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^{m-1} |\Delta x_z(k)| \quad (z = i, j) \quad (6)$$

其中: x_i, x_j —经过初始化处理的不同变量; k —序列编号; m —样本数; μ_{ij} —两变量的相关系数。

定义 ζ_k 为符号因子, 则:

若 $\Delta x_i(k) \Delta x_j(k) > 0$, 则称 x_i, x_j 在点 k 处趋势相同, $\zeta_k = 1$, 关联度为正;

若 $\Delta x_i(k) \Delta x_j(k) = 0$ 且 $\Delta x_i(k) \neq \Delta x_j(k)$, 则称 x_i, x_j 在点 k 处趋势无关, $\zeta_k = 0$, 对相关度无贡献;

若 $\Delta x_i(k) \Delta x_j(k) < 0$, 则称 x_i, x_j 在点 k 处趋势相反, $\zeta_k = -1$, 关联度为负。

$$v_{ij} = \frac{1}{1 + \left| \frac{|\Delta x_i(k) - \Delta x_i(k-1)|}{\bar{\Delta}_i} - \frac{|\Delta x_j(k) - \Delta x_j(k-1)|}{\bar{\Delta}_j} \right|} \quad (7)$$

$$\beta = \left| \frac{1}{m-2} \sum_{k=2}^{m-1} \zeta_k v_{ij}(k) \right| \quad (8)$$

$$r_{ij} = \left| \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^{m-1} \zeta_k \mu_{ij}(k) \right|^\beta \quad (9)$$

其中: 式(9)中的指数 β —数据的变化率对关联度的影响; v_{ij} —变化率关联系数; r_{ij} —关联度。

本文提出的一致灰关联度显然满足一般关联特征:

规范性, 即 $r_{ij} \in [0, 1]$, 且当两变量全相关时 $r_{ij} = 1$;

偶对称性, 即 $r_{ij} = r_{ji} \Leftrightarrow x = \{x_i, x_j\}$;

保序性, 即在无量纲处理后, 序列数据的大小顺序不变。

3.2 基于灰关联分析的辅助变量选择

辅助变量也称为二次变量 (Secondary Variable), 对于某个软测量对象, 一般来说, 其原始辅助变量数目、类型很多, 且相互耦合程度很大, 为了实时运行方便有必要对输入变量进行适当的降维处理。

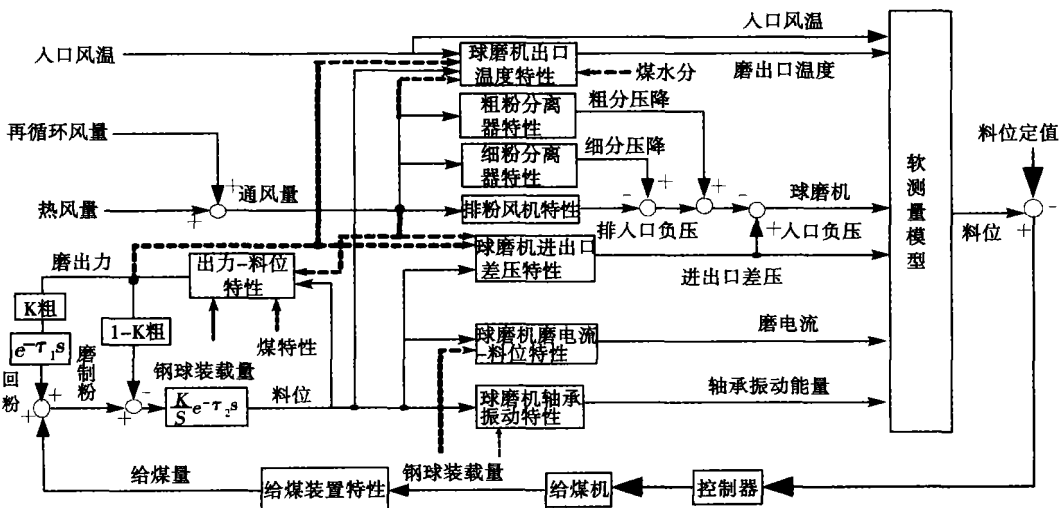


图 1 球磨机料位测控系统原理图

电厂锅炉制粉系统钢球磨煤机是一个灰系统, 由于很难获得其完整全面的机理知识, 从而无法获得其料位在线检测的机理模型, 但是该灰色系统的外围各辅助变量是可以在线监测的, 找出这些辅助变量与球磨机料位之间的关联特征, 就可以运用上述一致关联理论进行辅助变量的选择并运用合适的方法对料位软测量进行建模。球磨机料位与各辅助变量的关系如图 1 所示。

球磨机属于部分信息可知的灰色系统, 由图 1 可知, 球磨机料位与磨入口温度、出口温度、入口负压、差压、前后轴承振动能量、磨电流、钢球装载等存在着间接或直接的相关性。结合对球磨机的机理分析及先验信息, 采用一致关联度法对球磨机料位有直接关联(间接关联量通过先验知识给以首先排除)的七项指标进行分析, 结果如表 1 所示。

表 1 外部辅助变量与料位的关联度

相关辅助变量	与料位的关联度 r
磨入口负压 /Pa	0.762 7
磨进出口差压 /kPa	0.737 4
前轴承振动能量	0.763 7
后轴承振动能量	0.736 5
磨电流 /A	0.627 0
入口风温 / $^{\circ}\text{C}$	0.696 9
出口风粉温度 / $^{\circ}\text{C}$	0.786 5

在本次实验中, 指定满意阈值为 0.7, 由表 1 数据结果可以选择的辅助变量为磨入口负压、磨进出口差压、前轴承振动能量、后轴承振动能量、出口风粉温度。

4 球磨机料位软测量

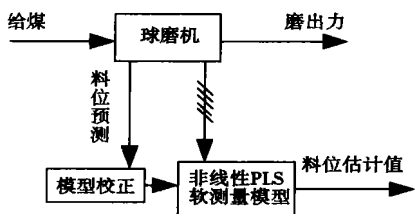


图 2 料位软测量结构图

针对在实际电厂运行中对钢球磨煤机料位在线检测的需要, 考虑到目前尚无成熟的技术或方法应用于实际, 本文结合上述的灰色一致关联理论, 进行了基于非线性 PLS 的球磨机料位软测量的实验研究。本文提出的基于非线性 PLS 的料位软测量方法

如图 2 所示。

在建模中, 以 3.2 节所选各辅助变量为输入、料位作为输出。为了得到较好的结果, 在建模前对实验数据采用了曲线拟合滤波降噪^[3], 并进行了标准化处理, 标准化方法为标准差标准化方法。

X 为 $n \times m$ 矩阵, Y 为 $n \times 1$ 列向量, 设对自变量 $X = (X_1, X_2 \dots X_m)$ 和因变量 y 观测了 n 组样本数据。非线性 PLS 分别在 X 和 Y 中提取成份 $t(t_1, t_2, \dots, t_a)$ 和 $u(u_1, u_2, \dots, u_a)$ ^[3], 提取成份时为了回归分析的需要, 有下列两个要求, 需要满足:

- (1) t 和 u 应尽可能多地携带它们各自数据表中的变异信息;
- (2) t 和 u 的相关程度能够达到最大。

首先提取第一个主成份, 在第一个成份 t_1 和 u_1 被提取后, 偏最小二乘回归分别实施 X 对 t_1 的回归以及 Y 对 u_1 的回归。然后利用 X 被 t_1 解释后的残余信息以及 Y 被 u_1 解释后的残余信息进行第二轮的成份提取, 如此反复。

非线性 PLS 的基本原理可以用图 3 的框图所示。不难发现, 非线性 PLS 的原理实现由三部分组成, 即: 输入辅助变量 X 线性化为 t_j , t_j 非线性化为 r_j , r_j 最后线性组成为输出 Y (图 3 中: w_j, q_j 为回归向量系数, α 为回归成分数)。

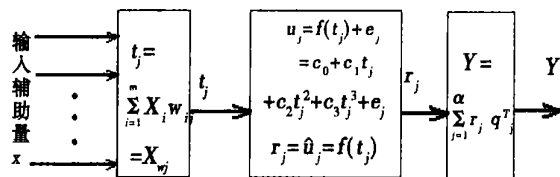


图 3 非线性 PLS 原理图

非线性偏最小二乘回归就是通过 t_1, t_2, \dots, t_a 到 u_1, u_2, \dots, u_a 的内部非线性映射及外部的线性组合, 实现 Y 对 t_1, t_2, \dots, t_a 的回归, 然后再表达成 Y 关于原变量 $X_1, X_2 \dots X_m$ 的回归方程, 从而完成非线性偏最小二乘回归建模。

应用上述原理进行软测量建模, 实验中非线性 PLS 的训练结束目标设为 1×10^{-5} , 相关实验结果如表 2 所示。

表 2 测试结果及误差(1)

训练数据	测试数据	测试相对误差平均值	测试相对误差最大值
12 组	7 组	1.66	2.767

表 3 测试结果及误差(2)

数据	Fill-level 实际值 (稳态 L 值) / %	Fill-level 预测值 / %	相对误差 绝对值 / %
1	21.471 8	21.935 5	2.16
2	39.863 4	38.994 3	2.180 2
3	53.177 5	52.286 2	1.676 1
4	66.082 4	65.274 8	1.222 1
5	85	86.07	1.259
6	34.874 9	34.757 1	0.337 8
7	34.775 7	35.737 8	2.767

由表 2 和表 3 实验分析结果并结合实际工程, 该软测量建模方法用于球磨机料位的预测效果是比较理想的, 最大相对误差小于 3%, 相对误差平均值小于 1.7%。

5 实验结果仿真

通过球磨机全负荷试验获得大量的不同给煤工况下的稳态数据样本, 用于训练非线性 PLS 模型的结构参数。建立的基于灰色一致关联法和非线性 PLS 的球磨机料位灰色软测量模型, 用于无锡某电厂的球磨机制粉系统, 试验时间为 2005 年 1 月 24 日, 起始时间为 09:24:43, 数据采样间隔为 3 s, 得到的由虚拟料位控制给煤机转速的变化趋势曲线, 如图 4 所示。

由图 4 可以发现, 用已建立的灰色软测量模型所预测到的球磨机虚拟料位随给煤机转速趋势符合

机理分析, 且反映了球磨机大滞后的特性。

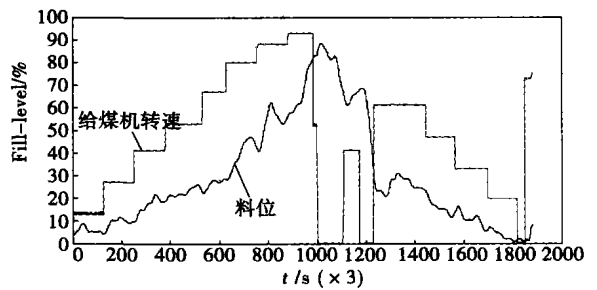


图 4 料位随给煤机转速变化仿真曲线图

6 结论

在分析了制粉系统球磨机筒内存煤量所受各种影响因素的情况下, 本文提出了灰色一致关联法, 运用非线性 PLS 回归方法首次实现了对料位的灰软测量建模^[3]。实验结果表明, 采用一致关联法对辅助变量的选择是可行的; 运用非线性 PLS 作为软测量建模方法其精度满足工程实际要求。

参考文献:

- [1] 王东风, 韩 璞. 基于 RBF 神经网络的球磨机负荷软测量[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(3): 311-313.
- [2] 屈耀红, 闫健国. 曲线拟合滤波在无人机导航数据处理中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2004(12): 1912-1914.
- [3] WOLD S, KETTANEH WOLD N, SKAGERBERG B. Nonlinear PLS modeling[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 1989, 7: 53-56.

(辉 编辑)

(上接第 564 页)

确。程序正常运行, 小汽机各种信号有效, 最后将 PLC 切换到 MONITOR 模式测试 PLC 运行, 在此模式下, 不能对程序强制。

5 结束语

大型汽轮发电机组给水泵小汽机保护控制系统是关系到整个机组能否安全稳定运行的重要组成部分, 采用 PLC 控制器替代小汽机保护系统中常规继电器控制逻辑是一种有效的控制方案。

本文针对 300 MW 机组小汽机保护系统, 采用 PLC 进行了控制系统的改造设计以及现场投运。由于系统采用了双 CPU 冗余热备运行和双电源供电设计, 大大提高了保护控制系统的安全可靠性, 同时

控制逻辑软件中新增设计了小汽机事故跳闸首出记忆功能, 为小汽机跳闸后事故分析提供了依据。现场投运结果表明, 系统运行稳定, 操作维护方便, 达到了设计要求。

参考文献:

- [1] 欧姆龙公司. CS1D 系列双机系统操作手册[R]. 上海: 欧姆龙公司, 2003.
- [2] 欧姆龙公司. SYSMAC CS 系列可编程序控制器指令参考手册[R]. 上海: 欧姆龙公司, 2003.
- [3] 欧姆龙公司. SYSMAC CS1 可编程序控制器[R]. 上海: 欧姆龙公司, 2004.
- [4] 谢柏友. 汽轮机热工监视与保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

(何静芳 编辑)

灰色软测量在球磨机料位检测中的应用 = **A Study of the Use of Grey Soft Measurement in the Detection of Fill-up Level of Ball Mills** [刊, 汉] / SU Zhi-gang, YU Xiang-jun, LU Zhen-zhong, et al (Power Department, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2006, 21(6). — 578 ~ 581

A ball mill is one of the main equipment items in the boiler milling systems of a thermal power plant. Its good working condition will decide to a certain extent the operating efficiency of a whole power plant. A nonlinear PLS regression method is combined with grey consistency correlation theory, which is then used for performing the soft measurement of the fill-up level of ball mills. Through the monitoring of the fill-up level inside a ball mill cylinder, the rotating speed of coal feeders can be controlled so as to make the ball mills operate in their optimum condition, thereby achieving a minimal unit power consumption in the coal pulverizing process. The results of engineering applications show that the soft measurement method has a relatively high assessment accuracy and can meet relevant practical requirements. As a result, it can solve the ball mill low efficiency problem related to its long-term low-load operations made necessary by a safe and conservative working mode. **Key words:** ball mill, fill-up level, grey soft measurement, consistent correlation degree, non-linear PLS

直吹式制粉系统与空气预热器的质量能量平衡关系分析 = **An Analysis of the Mass-and-Energy Balance Relationship Between a Direct-fired System and Air Preheater** [刊, 汉] / XING De-shan, YAN Wei-ping (Education Ministry Key Laboratory on Condition Monitoring and Control of Power Plant Equipment under the Energy and Power Engineering College of North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), ZHI Guo-jun (Engineering College under the Shanxi University, Taiyuan, China, Post Code: 030013) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2006, 21(6). — 582 ~ 584, 589

To solve the problems of an increase in cold-air share in a milling system and a rise in boiler exhaust gas temperature which are caused by a change in coal types for coal-fired boilers at a thermal power plant, the air quantity-temperature characteristic curves of the milling system and air preheater have been identified based on a thermodynamic calculation of the milling system and the three-chamber rotary air preheater. This has been realized with the positive-pressure direct-fired system and three chamber rotary air preheater of a 330 MW coal fired boiler unit at a North China large thermal power plant serving as an object of study. On the basis of the air mass balance and heat quantity balance of the milling system and air preheater, their operational points can be determined. The analysis and calculation results are in good agreement with the on-site operation conditions. Proceeding from the calculation results, an analysis and evaluation of the measures to reduce the exhaust gas temperature and cold air share has also been conducted. A reduction of flue gas temperature at the air preheater inlet can effectively lower the exhaust gas temperature but a reduction of the share of primary air sweeping across the air preheater rotor has little effect in reducing the exhaust gas temperature. **Key words:** utility boiler, direct-fired system, air preheater, mass balance, heat quantity balance

烧失量法测量循环流化床锅炉飞灰碳的系统误差 = **System Error Present When Measuring the Carbon Content of the Fly-ash of a Circulating Fluidized Bed Boiler by Using a Loss-on-ignition Method** [刊, 汉] / WANG Qi-min, WANG Yu-zhao, LU Jun-fu, et al (Thermal Energy Engineering Department of Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2006, 21(6). — 585 ~ 589

To measure the carbon content of the fly ash of a CFB boiler one still continues to adopt the loss-on-ignition method traditionally used for measuring carbon content of the fly ash of pulverized coal-fired boilers. As the mineral constituent of the fly ash of a CFB boiler is different from that of a pulverized coal-fired one, the use of the loss-on-ignition method for measuring carbon content of the fly ash of a CFB boiler may produce a certain system error. The authors have adopted the loss-on-ignition method combined with a TGA-FTIR (thermogravimetric analyzer-Fourier infrared spectrum) method to measure the carbon content of the fly ash of the CFB boiler and analyzed the system error involved in the measurement by using the loss-on-ignition method. The results of the measurements show that in case of using China National Electric Power Industry Standard DL/L567.6-95 Method B for measuring combustible matter in fly ash and slag of a CFB boiler