

球磨机新型控制策略研究与应用

吴建国, 张培建

(南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226007)

摘要: 球磨机制粉系统是电厂除锅炉燃烧系统外的又一重要调节系统。该系统具有多变量强耦合、非线性严重以及生产工况变化大等特性, 采用常规控制策略很难奏效。在对球磨机动态特性分析的基础上, 提出了一种新型控制策略。该控制策略采用软测量技术获取磨负荷信息, 通过协调器实现对球磨机的磨负荷和出口温度的有效控制。通过控制热、冷风量的比值实现对球磨机入口负压的控制。控制器均采用模糊 PID 控制算法, 以确保动态响应和稳态精度。实际运行效果表明, 该控制策略具有简单、可靠、实用等特点。

关键词: 球磨机; 多变量系统; 模糊控制; 软测量

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)03-0009-03

0 引言

在我国的中小型火电厂中, 球磨机制粉系统使用十分普遍, 并且该系统是电厂中除锅炉燃烧系统外的又一重要调节系统。制粉系统的任务是将含有少量石灰石的燃煤通过钢球磨煤机的研磨, 制成一定细度的煤粉, 并通过锅炉风力进行干燥、输送和分离, 最终将煤粉储入料仓^[1]。

制粉系统包括原煤仓, 振动给煤控制设备, 粗细粉分离设备, 球磨机, 粉仓, 绞龙输粉闸阀, 排粉机入口控制阀门, 球磨机热风、冷风、隔离、再循环控制阀门, 三次风、乏气风控制阀门等以及系统的大量测量设备, 是一个比较庞大的风粉混合系统。球磨机制粉系统的装机容量大(仅球磨机的功率一般就为几百千瓦), 由于采用中间储仓制, 系统为间断运行方式, 启停比较频繁, 故对锅炉燃烧系统的扰动大。

对制粉系统而言, 如何在保持磨煤机最大出力下运行, 以使吨煤电耗最省是系统控制所追求的目标。但由于球磨机是一个多变量耦合严重的非线性系统, 采用常规的控制方案很难达到控制目标。

本文以南通一热电站球磨机制粉系统的控制为例, 在对球磨机的动态性能分析的基础上, 提出了一种有效控制策略。该控制策略采用软测量技术获取磨负荷信息, 通过协调控制器实现对球磨机磨负荷和出口温度的控制。通过控制热、冷风量的比值实现对球磨机入口负压的控制。控制器均采用模糊 PID 控制算法, 利用模糊控制实现动态过程的有效控制, 利用 PID 控制保证系统的稳态精度。

实际运行结果表明, 该控制策略能取得满意的控制效果。

1 球磨机动态特性分析

球磨机制粉系统的核心设备是球磨机。球磨机本身是一个包含机械能量转换、热交换的复杂设备。图 1 为球磨机的输入/输出示意图^[2-3]。

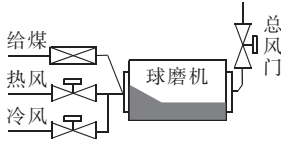


图 1 球磨机系统示意图
Fig.1 Ball mill system

球磨机的输入一般有冷风量 F_c 、热风量 F_h 和给煤量 F_c 。而被控制量有入口负压 p 、出口温度 T 和磨负荷 L 。控制球磨机入口负压的意义在于使整个球磨机处于负压状态, 防止煤粉和球磨机的过大漏风。球磨机的出口温度是指球磨机出口风粉混合物的温度, 它是反映球磨机干燥出力、防止煤粉爆燃或爆炸的重要参数。磨负荷是反映制粉时滚筒内存煤量。

在球磨机运行过程中, 通过调节给煤量、热风量和冷风量, 以保证球磨机鼓筒内的存煤量(即磨负荷)、磨煤机出口温度, 以及入口负压分别处在最佳值附近, 从而使球磨机高效运行。球磨机的电机功率 P_b 、进出口压差 Δp 、磨出力 Q 与磨煤机体内的存煤量 N 之间的关系^[4]如图 2 所示。在特性曲线的 I 区, 球磨机的耗电量大, 出力小; III 区易堵煤; II 区电机功率不是最大, 但球磨机的出力为最大, 这是理想工作区。由特性曲线还可看出, 进出口压差可以间接反映磨负荷。

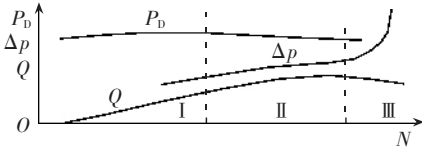


图 2 磨煤机特性曲线

Fig.2 The characteristic curves of ball mill

从上面的分析可以得出: 球磨机具有多容高阶、纯迟延较大、参数间耦合的动态特性。其数学模型的

结构可以近似表示为

$$\begin{bmatrix} p(s) \\ T(s) \\ L(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_{11}e^{-t_{11}s}}{\tau_{11}s+1} & \frac{K_{12}e^{-t_{12}s}}{\tau_{12}s+1} & \frac{K_{13}e^{-t_{13}s}}{\tau_{13}s+1} \\ \frac{K_{21}e^{-t_{21}s}}{\tau_{21}s+1} & \frac{K_{22}e^{-t_{22}s}}{(\tau_{22}s+1)^{n_1}} & \frac{K_{23}e^{-t_{23}s}}{\tau_{23}s+1} \\ \frac{K_{31}e^{-t_{31}s}}{\tau_{31}s+1} & \frac{K_{32}e^{-t_{32}s}}{\tau_{32}s+1} & \frac{K_{33}e^{-t_{33}s}}{(\tau_{33}s+1)^{n_2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_r(s) \\ F_h(s) \\ F_c(s) \end{bmatrix}$$

式中 K 为增益; τ 为时间常数; t 为纯滞后时间。

从阶跃响应的时间看,磨煤机入口负压的响应最快、出入口压差响应最慢,其时间之比达到几十。这些时间响应的快慢均反映在式中的时间常数上。

上式是在某一条件下线性化得到的。事实上球磨机动态特性具有变幻性,这主要表现在有自衡能力和无自衡能力特性之间的差别和信号迟延时间长短的差别上。球磨机出入口压差在热空气带粉量最大值范围内表现为有自衡能力的特性,而在这最大值之外时则表现为无自衡能力的特性。入口负压和出口温度的迟延远较压差的迟延小。球磨机动态特性的这种变幻性大大增加了控制难度。

综上所述,球磨机难以控制的原因可归结为以下 4 点。

a. 系统具有多变量强耦合特性。如球磨机的入口负压 p 与出口温度 T 之间耦合十分严重。

b. 信号难以测量。磨负荷难以直接测量。目前,通常采用磨煤机进出口压差 Δp 近似反映球磨机负荷。但压差信号受筒内风量的影响,而且延迟大,不能及时正确反映存煤量。信号难以测量的另一方面在于制粉系统的粉尘影响,使测量仪器的灵敏度降低,尤其是易造成变送器导压管堵塞、出口温度测量元件磨损等问题。

c. 系统动态特性所具有的变幻性。

d. 有限的调节手段。制粉系统需要对磨煤机的入口负压、出入口差压、出口温度、磨煤机负荷进行控制。但控制手段一般只有热风门、循环风门(或温风门、冷风门等)和给煤机转速等有限的调节手段。

目前,球磨机制粉系统通常采用 3 套独立的常规 PID 控制,这样的控制方式既无法消除回路间的相互干扰,同时对于被控对象的大时滞和和变幻性更是无能为力。因此在很多场合下,尤其在一些规模比较小的热电站,往往采用手动控制。这使得球磨机制粉系统很难工作在最佳经济工况,制粉单耗高。

因此,寻求更好的控制方式,实现对球磨机制粉系统进行有效控制,是人们一直在追求的目标。文献[5]提出采用智能解耦的方法,控制系统由基础控制级、协调控制级以及管理决策级构成,控制系统复杂。文献[6]将模型预测控制引入球磨机制粉系统,仿真结果表明,该方法不但实现了系统的解耦,同时又能获得较为满意的控制效果。文献[7]采用的递阶模糊控制,可使模糊控制规则大大缩减。文献[8]

提出一种多变量解耦控制策略,实现对球磨机入口负压和出口温度的有效控制。事实上,对球磨机制粉控制系统,在设计时首先应综合考虑安全可靠、高效节能以及实用等因素,而不是一味追求控制系统的先进性。本文所提出的对球磨机制粉系统的控制策略,具有实用、可靠等特点。

2 球磨机制粉系统控制策略

2.1 控制策略确定

通过对球磨机制粉系统的进一步分析可知,磨负荷是需控制的关键变量。因此,在确定控制策略时,把球磨机的磨负荷作为重要的被控变量。但控制磨负荷的关键是磨负荷的测量问题。多年来,磨负荷的测量一直是薄弱环节,尽管人们曾先后研究称重法和利用音频传感器以及通过测量球磨机的进出口压差来确定球磨机的存煤量等方法[9-10],但在实际应用中均存在问题。以目前采用最多的压差法测量为例,不但粉尘会造成变送器导压管的堵塞,使测量仪器的灵敏度降低,而且煤的含水量、煤质及钢球装载量的变化,均对压差有影响。

利用进出口压差法测量磨负荷实际是一种软测量的方法,即选择 1 组与被测变量(被估变量)相关的可测变量,构造某种以可测变量为输入、被估变量为输出的数学模型,用计算机软件实现重要过程变量的估计。考虑到进出口压差法中变送器导压管易堵塞的问题,本系统中没有选用进出口压差作为可测变量来估计磨负荷,而是把出口温度 T 、热风量 F_h 作为估计磨负荷的可测变量。因为进入球磨机原煤的温度远低于球磨机内的温度,给煤量 F_c 的变化能显著影响出口温度 T 。因此,本系统将磨负荷 L 作为被估变量,其关系可表示为

$$L=f(T, F_h)$$

考虑到球磨机入口负压主要受冷风量和热风量的影响,因此采取控制加入球磨机热风量和冷风量的比值,以实现球磨机入口负压的控制。

球磨机出口温度的控制主要从 2 个方面保证:

a. 在设计磨负荷回路时兼顾到出口温度控制问题,可通过协调控制器实现;

b. 控制好磨负荷和入口负压来保证出口温度,因为磨负荷和入口负压均影响球磨机的出口温度。

由此可见,球磨机的控制系统可简化为如图 3 所示结构。

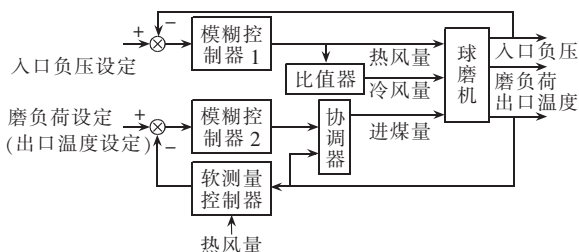


图 3 球磨机控制系统结构图

Fig.3 The configuration of ball mill control system

模糊控制器 1 为入口负压控制器,采用入口负压的偏差及偏差变化率作为输入变量,输出变量为对应的热风量,通过比值器可得到相应的冷风量。这一控制回路主要实现对球磨机入口负压的控制。模糊控制器 2 与软测量控制器,以及协调控制器构成磨负荷与出口温度控制回路。通过软测量控制器将出口温度与热风量,获得所需的磨负荷信号,模糊控制器 2 的输出量与出口温度测量值送至协调控制器,以获得球磨机的给煤量。与其他球磨机控制系统相比,所设计的系统较简单、实用。

2.2 模糊控制器设计

模糊控制器 1 和模糊控制器 2 均为模糊 PID 控制器。这里以模糊控制器 1 的设计为例,介绍模糊 PID 控制器的设计。控制器的形式采取模糊控制和 PID 控制相结合的方案。根据偏差大小确定采用模糊控制还是 PID 控制,见图 4。在 $|e| \geq \varepsilon$ 的动态范围内实行模糊控制,在 $|e| < \varepsilon$ 范围内实行 PID 控制。其优点在于,利用模糊控制可以获取系统动态响应的快速性;利用 PID 控制来减小静差。

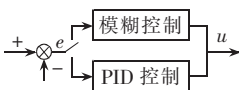


图 4 模糊 PID 控制器
Fig.4 Fuzzy PID controller

对于模糊控制器,球磨机入口负压偏差的变化范围取 $(-300\text{ Pa}, +300\text{ Pa})$,压力偏差变化率的范围取 $(-50\text{ Pa/s}, +50\text{ Pa/s})$ 。2 个输入变量以及输出变量语言值的模糊子集均取 $(NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB)$,它们的量化论域均为 $(-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3)$ 。为简化起见,各模糊子集的隶属度函数均取三角型。并通过模糊规则的推理,以及采用重心法求取输出量 U 的精确值,得到控制表(见表 1)。

表 1 模糊控制表(U 值)
Tab.1 Fuzzy control table(U value)

e	de						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	2	2	1	0	0
-2	3	2	2	1	1	0	0
-1	2	2	1	1	0	-1	-1
0	2	1	1	0	-1	-1	-2
1	1	1	0	0	-1	-2	-2
2	1	0	-1	-1	-2	-2	-3
3	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3

PID 控制的主要任务是保证稳态精度。因此,在参数整定时,加大积分的作用。

模糊控制器 2 也是采用模糊 PID 控制器,设计与入口负压控制回路的控制器设计相类似。由于磨负荷控制回路兼顾到出口温度的控制,所以控制器输出量不能直接作为球磨机的给煤量。在模糊控制器 2 的输出加入一个协调控制器。协调控制器依据当前的出口温度,以及模糊控制器 2 的输出值,综合得到给煤量的值,以防给煤量突变对球磨机出口温度的影响。

3 结语

本系统自 2004 年 2 月开始投入使用,目前运行良好。从锅炉运行趋势图看,磨煤机入口压力的误差波动范围为 $\pm(30 \sim 50)\text{ Pa}$ 。磨煤机出口温度的误差波动范围为 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时,磨负荷能稳定在一个满意的范围内。通过 2004 年 2~11 月期间的数据统计,并与 2003 年全年数据比较,研磨电耗由 2003 年人工手动调节时的 $22.3\text{ kW}\cdot\text{h/t}$,降为 $20.4\text{ kW}\cdot\text{h/t}$,总制粉研磨电耗下降 8.52%。

实际运行表明,该设计具有方案简单、运行可靠、节能效果明显等特点。

参考文献:

[1] 葛文胜. 基于专家模糊智能的中储式球磨机制粉系统[J]. 华北电力技术,2004(8):28-31.
GE Wen-sheng. Pulverizing control system of ball-tube mills based on expert fuzzy control[J]. North China Electric Power,2004(8):28-31.

[2] 刘军,马海林,高广福. 火电厂球磨机非线性自适应控制[J]. 计算技术与自动化,2004,23(4):48-50.
LIU Jun,MA Hai-lin,GAO Guang-fu. Nonlinear adaptive control of ball mill in power plant[J]. Computing Technology and Automation,2004,23(4):48-50.

[3] 王永健,张建宇,梁伟平,等. 中储式球磨机热力学建模及仿真[J]. 华北电力大学学报,2005,32(3):66-68.
WANG Yong-jian,ZHANG Jian-yu,LIANG Wei-ping,et al. Thermodynamic modeling and simulation of ball-mill pulverizing system[J]. Journal of North China Electric Power University,2005,32(3):66-68.

[4] 王铁军,朱峰. 钢球磨煤机制粉系统运行特性分析和控制研究[J]. 合肥工业大学学报,2002,25(4):605-609.
WANG Tie-jun,ZHU Feng. Characteristic analysis of the pulverizing system of the tube coal mill and control strategies[J]. Journal of Hefei University of Technology,2002,25(4):605-609.

[5] 岳恒,周晓杰,王昕,等. 钢球磨中储式制粉系统智能解耦控制仿真系统[J]. 系统与仿真学报,2002,14(10):1340-1343.
YUE Heng,ZHOU Xiao-jie,WANG Xin,et al. A simulation system for intelligent decoupling control of coal-pulverizing system with ball mill[J]. Journal of System Simulation,2002,14(10):1340-1343.

[6] 王东风. 制粉系统球磨机的模型算法解耦控制[J]. 工业仪表与自动化装置,2002(1):23-25.
WANG Dong-feng. The MAC decoupling design and its application to a ball mill pulverizing system[J]. Industrial Instrument and Automatic Equipment,2002(1):23-25.

[7] 刘长良,梁伟平,董泽. 钢球磨煤机制粉系统的递阶模糊控制[J]. 动力工程,2002,22(5):1969-1973.
LIU Chang-liang,LIANG Wei-ping,DONG Ze. The hierarchical fuzzy control algorithm for ball mill pulverizing system in power plant[J]. Power Engineering,2002,22(5):1969-1973.

[8] 孙瑞,肖伯乐,茅民强,等. 中间储仓式球磨机制粉系统自动控制策略及实践[J]. 发电设备,2005(1):48-51.
SUN Rui,XIAO Bo-le,MAO Min-qiang,et al. Automatic control strategy for intermediate bunker type ball mill pulverizing systems and its application[J]. **Generate Electricity Equipment**,2005(1):48-51.

[9] 吕剑虹,沈炯,杨榕,等. 中储式钢球磨煤机制粉系统控制策略研究与应用[J]. 中国电力,2000,33(9):57-61.
LÜ Jian-hong,SHEN Jiong,YANG Rong,et al. Study of control strategy for and its application in tube coal mill system with intermediate storage bunker[J]. **Electric Power**,2000,33(9):57-61.

[10] 王东风. 钢球磨煤机制粉系统的优化控制[J]. 动力工

程,2002,22(3):1793-1796.
WANG Dong-feng. A comprehensive optimal control strategy for ball mill coal pulverizing system[J]. **Power Engineering**,2002,22(3):1793-1796.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:
吴建国(1955-),男,山东莱州人,副教授,博士研究生,研究方向为系统集成、智能控制(**E-mail**:wu.jg@ntu.edu.cn);
张培建(1955-),女,河南济远人,副教授,硕士,研究方向为复杂生产过程的先进控制技术(**E-mail**:zhang.pj@ntu.edu.cn)。

Control strategy for ball mills

WU Jian-guo,ZHANG Pei-jian

(School of Electric Engineering,Nantong University,Nantong 226007,China)

Abstract: Ball mills are strongly coupled,multivariable and nonlinear system with violently variable operating conditions. Usual control strategies are ineffective. A new strategy is put forward based on analyzing the dynamic characteristics of ball mills. It uses soft sensor to get the information of mill load and uses coordinator to effectively control mill load and output temperature. It controls the inlet negative minus pressure via the quantity ratio of hot and cold winds. In order to ensure the dynamic response and static accuracy,fuzzy PID controllers are applied. The actual application expresses that the proposed control strategy is simple,reliable and practical.

This project is supported by Natural Science Fund of Jiangsu Province Education Office (04KJD510141).

Key words: ball mill; multivariable system; fuzzy control; soft sensor