

文章编号:1000-582X(2004)01-0107-05

# 电站锅炉磨煤机模糊—PID 复合控制系统仿真\*

李刚, 王广军

(重庆大学 动力工程学院, 重庆 400030)

**摘要:**针对目前国内燃煤电站钢球磨制粉系统运行控制过程存在的主要问题,建立了钢球磨制粉系统动态过程数学模型。在对系统的动态特性进行了较为全面的仿真分析基础上,基于模糊控制理论,提出参数在线自校正模糊—PID 控制,并对所提出的控制系统的控制效果进行了仿真研究。结果表明,所提出的模糊—PID 复合控制方案能显著提高燃煤电站钢球磨制粉系统的运行控制效果和适应能力。

**关键词:**球磨机; 模糊逻辑; 智能控制; 仿真

**中图分类号:**TK323

**文献标识码:**A

钢球磨煤机制粉系统在我国大中型燃煤电厂中具有广泛的应用,同时也是厂用设备中的耗电大户。球磨机制粉系统是一个典型的多变量非线性时变系统,各控制量和被控量之间存在着相当严重的耦合,且具有大时滞及模型时变的特点。由于对象本身的复杂性,使得在目前国内火电机组普遍采用的单回路 PID 控制系统中,许多系统无法投入运行,即使勉强投入,也难以取得令人满意的控制效果,严重影响火电机组的运行经济性和安全性<sup>[1]</sup>。因此,锅炉制粉系统控制方法的研究及现有的磨煤机控制系统的改造,是热工过程控制领域的热点问题之一。

模糊控制作为一种新型的控制方法,在一定程度上具有人的智能性<sup>[2]</sup>。它无需知道被控对象的数学模型,具有比常规控制系统更好的稳定性和更强的鲁棒性,而且容易与工人操作经验相结合。文中针对目前国内燃煤电站钢球磨煤机制粉系统运行控制过程存在的主要问题,建立了钢球磨制粉系统动态过程的数学模型,并分析了在各种输入扰动情况下制粉系统输出的动态响应和制粉系统动态过程的耦合特性。在此基础上,提出了钢球磨制粉系统的参数在线自校正模糊—PID 控制。通过仿真实验,将所提出的控制系统的控制效果与常规 PID 控制作比较,证明了所提出的控制方案的有效性。

## 1 制粉系统的动态特性

### 1.1 制粉系统的数学模型

对于煤粉系统,在建模中需要采用对磨煤机建立质量平衡和热量平衡的基本方法<sup>[3]</sup>。所建立的数学模型主要是为了研究球磨机的控制问题,在模型建立过程中基于以下简化前提或基本假设<sup>[4]</sup>:模型仅从整体上反映磨煤机特性,不涉及磨筒内复杂的磨煤过程;将磨筒、下降干燥管、回粉管合并考虑;磨煤机出口温度是筒体煤、风混合物温度;不考虑制粉系统内热损失;磨筒内钢球视为定值;漏风集中在磨煤机入口。

#### 1) 磨煤机进出口质量平衡方程

$$\frac{dM_m}{d\tau} = \frac{B_g - B_f}{3.6} \quad (1)$$

式中: $B_g$  为给煤量, t/h;  $M_m$  为筒内存煤量, kg;  $B_f$  为磨煤机出力, t/h, 按(2) 式计算。

$$B_f = B_b K_{im} K_{mm} K_y K_q \quad (2)$$

式中: $B_b$  为由磨煤机型号计算的出力, t/h;  $K_{im}$ 、 $K_{mm}$ 、 $K_y$ 、 $K_q$  分别指磨煤机出口温度、磨煤机筒内存煤量、磨煤机内通风量、粗粉分离器折向门开度变化对磨煤机出力影响的修正系数。

#### 2) 磨煤机进出口能量平衡方程

$$B_g [x_g c_g + (1 - x_g) c_c] t_g / 3.6 + G_{rk} c_k t_k +$$

\* 收稿日期:2003-09-19

作者简介:李刚(1980-),男,吉林市人,重庆大学硕士研究生,主要从事热工仿真及热工自动控制的研究。

$$T_1 (Bc_f/3.6 + G_k c_k) - Bx_g(r_g + c_{sq} T_1) / 3.6 = (M_j c_j + M_m c_f) dT_1 / d\tau \quad (3)$$

式中： $c_s, c_e, c_k, c_f, c_{sq}$  分别为水、燃料干燥基、空气、煤粉、水蒸气的比热， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ； $t_{rk}, t_{zx}, t_{ly}, T_1$  分别为热风温度、再循环风温度、漏风温度、出口温度， $\text{K}$ ； $k_p$  为磨煤机功率转化为热量的系数； $x_g$  为给煤中水分所占的份额； $x_f$  为给煤在磨煤机内被干燥后失去的水分占煤质量的份额。

3) 磨煤机入口负压  $P_m$  方程

$$P_m = P_{m0} + \Delta P_m \quad (4)$$

式中： $P_{m0}$  为磨煤机出口压力， $\text{Pa}$ ； $\Delta P_m$  为进出口压差， $\text{Pa}$ 。

$$P_{m0} = \zeta G_k^2 + P_{zx} - P^0 \quad (5)$$

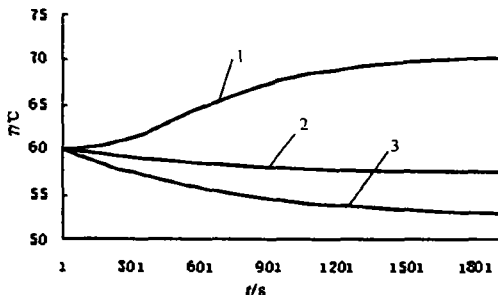
式中： $\zeta$  为综合阻力系数； $P_{zx}$  为排粉机出口压力， $\text{Pa}$ ； $P^0$  为排粉风机的零位压力， $\text{Pa}$ 。

$$\Delta P_m = \sum \zeta_m (1 + 0.8\mu_m) H_{dm} \cdot k_s \quad (6)$$

式中： $\sum \zeta_m$  为磨煤机及其进出口管总的阻力系数； $H_{dm}$  为磨煤机出口气体的动压， $\text{Pa}$ ； $\mu_m$  为磨煤机出口气体中煤粉的浓度； $k_s$  为磨筒内空气流通面积对  $\Delta P_m$  的影响。

1.2 动态特性仿真

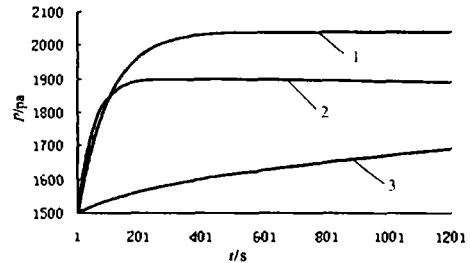
为了进一步分析钢球磨制粉系统的动态特性，分别将给煤机转速、热风门开度、再循环风门开度增加 10%，得到的出口温度及入口负压的变化曲线如图 1、图 2 所示。



1. 热风门开度增加 10%；2. 再循环风门开度增加 10%；3. 给煤机转速增加 10%

图 1 出口温度变化曲线

由以上的仿真可知，钢球磨制粉系统是一个强耦合的多变量非线性时变系统。钢球磨煤机本身是一个包含了机械能量转换，热交换和两相流动的复杂过程，任何一个控制变量的改变都会造成所有被控变量的变化，而且系统还具有时变性，这都将为球磨机的自动控制带来困难。建立模型的目的是为了更好的掌握制粉系统的运行特征。而在实际应用时，采用的是模糊控



1. 再循环风门开度增加 10%；2. 热风风门开度增加 10%；3. 给煤机转速增加 10%

图 2 入口负压变化曲线

制技术，无需知道被控过程的精确数学模型。

2 参数在线自校正模糊控制

2.1 基本模糊控制算法

参数在线自校正方法，即根据偏差和偏差变化率对控制器的参数进行在线修正。它可以有效解决常规模糊控制器动、静态特性之间的固有矛盾。

参数在线自校正模糊控制器结构框图如图 3 所示，实线部分为基本模糊控制器。

$$e(t) = R - Y(t); c(t) = e(t) - e(t - 1) \quad (7)$$

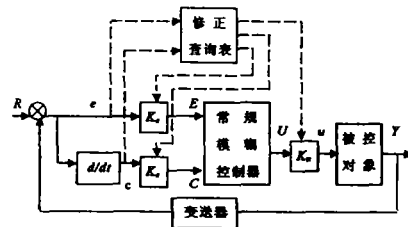


图 3 参数在线自校正模糊控制器结构框图

1) 图中的常规模糊控制器采用连续式实现方式，这样便于对其参数进行在线校正。

$$E(t) = Q[e(t)K_e(t)];$$

$$C(t) = Q[c(t)K_c(t)], Q \text{ 取整值。}$$

3) 由  $E(t)$ 、 $C(t)$  查模糊控制规则表得  $U(t+1)$ ，那么控制输出值  $u(t+1) = U(t+1)K_u(t)$ 。

2.2 参数  $K_e, K_c, K_u$  对系统性能的影响

一般说来，各参数对系统性能的影响是： $K_e$  越大，系统上升速率就越快，愈容易产生振荡； $K_c$  越小，系统的过渡时间越长； $K_e$  越大，系统偏差过零时的变化率就被钳制得越小， $K_e$  对超调的遏制作用非常明显； $K_c$  越小，系统输出上升变化率将越大，易导致产生过大的超调和小幅度振荡，尤其是反向超调增加； $K_u$  越大，系统上升时间越短，但易导致振荡； $K_u$  越小，系统动态过程越长<sup>[5]</sup>。

应指出的是，在一个模糊控制系统中， $K_e, K_c, K_u$  3 个参数不是彼此孤立的，而是统一的整体，应该有良好的

的匹配,才会获得良好的控制品质。

### 2.3 典型二阶系统的阶跃响应曲线分析

可把典型的二阶系统的阶跃响应曲线划分为 6 个不同阶段<sup>[6]</sup>,如图 4 所示。

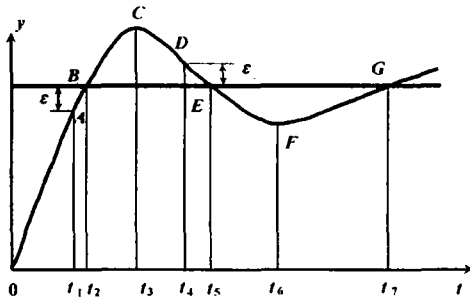


图 4 二阶系统的单位阶跃响应曲线

0 ~ t<sub>1</sub> 曲线 OA 段: 控制系统启动阶段, 为提高系统响应的快速性, 宜适当增大 K<sub>c</sub> 和 K<sub>u</sub>, 减小 K<sub>i</sub>。

t<sub>1</sub> ~ t<sub>2</sub> 曲线 AB 段: 对象输出接近给定值, 并存在偏差 ε 时, 应降低超调, 增大 K<sub>c</sub>, 减小 K<sub>i</sub> 和 K<sub>u</sub>。

t<sub>2</sub> ~ t<sub>3</sub> 曲线 BC 段: 对象输出已超过给定值, 且偏差呈增大趋势, 宜适当增大 K<sub>c</sub> 和 K<sub>u</sub>, 并减小 K<sub>i</sub>, 以降低超调量, 使输出尽量回到给定值。

t<sub>3</sub> ~ t<sub>4</sub> 曲线 CD 段: 对象输出趋向给定值接近, 并存在较大偏差时, 宜适当提高系统响应速度, 应增大 K<sub>c</sub> 和 K<sub>u</sub>, 减小 K<sub>i</sub>。

t<sub>4</sub> ~ t<sub>5</sub> 曲线 DE 段: 对象输出接近给定值, 并且偏差较小, 适当减小 K<sub>c</sub> 和 K<sub>u</sub>, 增大 K<sub>i</sub> 避免回调。

t<sub>5</sub> ~ t<sub>6</sub> 曲线 EF 段: 对象输出已小于给定值, 并且负偏差呈增大趋势, 应适当增大 K<sub>c</sub> 和 K<sub>u</sub>, 使输出尽快回到给定值附近。

t<sub>6</sub> ~ t<sub>7</sub> 曲线 FG 段: 对象基本类似 AB 段, 负偏差呈减小趋势, 为尽快稳定, 控制不宜过强。适当增大 K<sub>c</sub>, 减小 K<sub>i</sub> 和 K<sub>u</sub>, 否则会再次出现超调。

### 2.4 参数校正算法

$$\begin{aligned} K_c(t) &= K_c(t-1) + a; K_c(t) = K_c(t-1) + b; \\ K_u(t) &= K_u(t-1) + c \end{aligned} \quad (8)$$

式中: K<sub>c</sub>(t)、K<sub>c</sub>(t-1)、K<sub>c</sub>(t)、K<sub>c</sub>(t-1)、K<sub>u</sub>(t)、K<sub>u</sub>(t-1) 分别为当前时刻和上一时刻的参数值; a、b、c 分别为 K<sub>c</sub>、K<sub>c</sub> 和 K<sub>u</sub> 的动态校正因子。

校正参数 K<sub>c</sub>、K<sub>c</sub>、K<sub>u</sub> 的条件语句如下:

如果 e > 0; c < 0 且 e > ε,

那么 a = ΔK<sub>c</sub>, b = -ΔK<sub>c</sub>, c = ΔK<sub>u</sub>;

如果 e > 0; c < 0 且 e < ε, 或 e < 0; c > 0 且 e

< ε 那么 a = -ΔK<sub>c</sub>, b = -ΔK<sub>c</sub>, c = ΔK<sub>u</sub>;

如果 e < 0; c < 0, 或 e > 0; c > 0,

那么 a = ΔK<sub>c</sub>, b = ΔK<sub>c</sub>, c = -ΔK<sub>u</sub>;

如果 e < 0; c > 0 且 e > ε,

那么 a = ΔK<sub>c</sub>, b = ΔK<sub>c</sub>, c = -ΔK<sub>u</sub>;

其中: e、c 分别为当前时刻的偏差和偏差变化率;

ΔK<sub>c</sub>、ΔK<sub>c</sub> 和 ΔK<sub>u</sub> 分别为 K<sub>c</sub>、K<sub>c</sub> 和 K<sub>u</sub> 的增量, 应根据具体情况选取。文中选 ΔK<sub>c</sub> = K<sub>c</sub>/15、ΔK<sub>c</sub> = K<sub>c</sub>/20、ΔK<sub>u</sub> = K<sub>u</sub>/25。

### 3 模糊—PID 复合控制器

由于模糊控制器本质上是一种 PD 控制器, 缺乏积分环节, 导致系统有稳态误差, 且在接近稳态时易产生抖动。这是模糊控制器的主要缺点之一。

模糊—PID 控制器原理如图 5 所示, 本控制器有模糊和 PID 两种模式。其中的模糊控制器采用参数在线自校正模糊控制器。

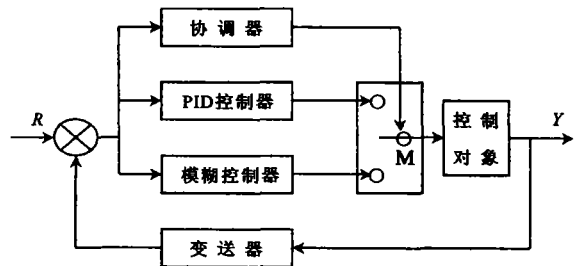


图 5 模糊—PID 控制器结构框图

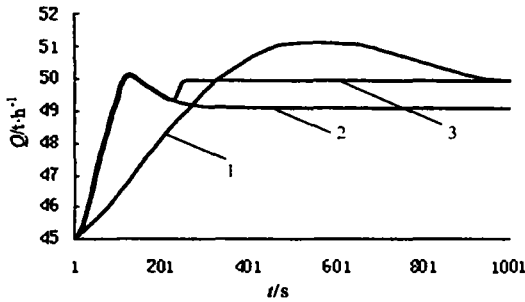
图中 M 是“软件开关”, 它表示两种控制规律不是同时起作用, 而是由协调器来切换的。通常, 在系统过渡过程的初始及中期阶段, 控制的主要目的是尽快减小偏差使系统输出接近给定值, 不涉及稳态误差的问题。此时控制系统可采用模糊控制, 以充分利用模糊控制在较大偏差时控制性能好的长处; 而在系统接近稳定状态时, 控制器切换至常规 PID 控制器, 以消除系统的静态误差。从而最终使得这种控制器具有响应快, 稳态精度高的特点。并且, 其中的模糊和 PID 控制器可以分开设计, 若已有 PID 控制器, 可以不用修改原程序, 只需嵌入模糊控制模块, 再加一条切换判断语句即可<sup>[7]</sup>。

在模糊—PID 控制器中, 协调器的作用是十分重要的。过早的切换到 PID 控制方式, 将不能充分发挥模糊控制器的优点, 使控制效果变差。切换得过早, 将使整个控制过程的时间延长。当闭环控制系统由模糊控制方式向 PID 控制方式切换时, 应保证系统的过渡过程已接近稳态, 而并不仅仅是输出值接近给定值。若仅依据偏差 e 值的大小来判断是否该切换到 PID 控制方式往往会造成切换过早, 影响控制效果。因此在考虑偏差 e 值大小基础上, 还应考虑偏差变化率 c 及持续时间等因素, 以确保控制方式切换的及时、准确。

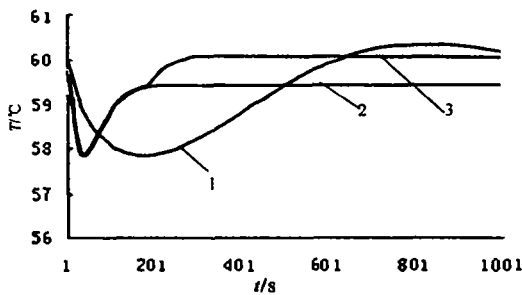
### 4 计算机仿真

为了检验参数在线自校正模糊—PID 控制器的有效性, 并进一步比较各种控制方案之间控制效果的差别, 对所建立的钢球磨制粉系统的非线性数学模型, 分

别用常规 PID 控制器、参数在线自校正模糊控制器及参数在线自校正模糊—PID 控制器对其进行控制仿真。图 6 是磨负荷定值阶跃变化曲线及其对出口温度的影响曲线,图 7 是出口温度定值阶跃变化曲线及其对磨负荷的影响曲线。



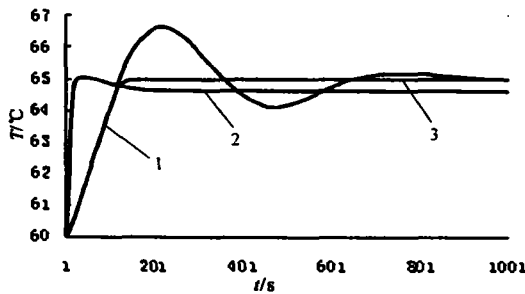
(a) 负荷变化曲线



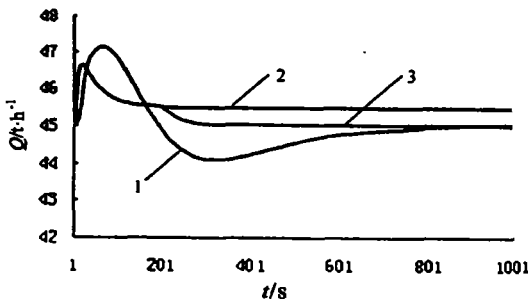
(b) 出口温度变化曲线

1. PID 控制;2. 参数在线自校正模糊控制;3. 模糊—PID 控制

图 6 负荷阶跃变化时响应曲线



(a) 出口温度变化曲线



(b) 负荷变化曲线

1. PID 控制;2. 参数在线自校正模糊控制;3. 模糊—PID 控制

图 7 出口温度阶跃变化时响应曲线

通过仿真曲线可知:

1) 参数在线自校正模糊控制器控制效果明显好于常规 PID 控制器,能够有效缩短整个控制过程,减少超调量;而且在一定程度上减轻了由于各控制量之间耦合所带来的负面影响,使控制系统具有良好的抗干扰能力。但是由于模糊控制器本身缺少积分环节,致使单纯的模糊控制的稳态特性难以令人满意,系统的最终状态往往存在一定的稳态误差。

2) 由于模糊—PID 控制器在控制过程的初始及中期阶段采用模糊控制方案,这就有效的继承了模糊控制在大偏差时超调量小,调节时间短,具有良好的控制效果的优点。在接近稳态时,由于控制方法的切换,控制过程又具有了 PID 控制稳态误差小的优点,从而克服了模糊控制存在稳态误差,且易产生抖动的缺点。通过两种控制器之间的相互取长补短,最终使得控制效果达到令人满意的程度。

### 5 结 论

针对球磨机制粉系统多变量强耦合及模型时变的特点,通过建立数学模型,对其进行了较全面仿真分析。在此基础上提出了参数在线自校正模糊—PID 控制方案。该方案是模拟人脑在处理问题时的思维过程和决策过程,然后决定作什么样的控制行为。边判别边修改参数,通过查询模糊控制规则表,控制输出值,并根据控制过程所处的不同阶段采用不同的控制方式。该方案吸取了模糊控制和 PID 控制各自的优点,在继承模糊控制的良好控制效果的同时消除了稳态误差,即使在无法获得被控制对象精确数学模型的情况下,一般也能获得良好的动、静态控制性能。可以有效地利用现场现有的常规控制系统,现场改造工作量小,具有十分良好的推广应用价值。

### 参考文献:

- [1] 陶邦彦. 电站锅炉钢球磨制粉、燃烧系统现状和发展[J]. 中国电力, 2002, 35(2): 23-26.
- [2] 杨志,李太福,盛朝强,等. 基于仿人智能的复杂关联系统控制[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2002, 25(7): 9-11.
- [3] 章臣隹. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京:水利电力出版社,1987.
- [4] 徐盛仪,付明地. 球磨机制粉系统动态数学模型及其MMS仿真[J]. 重庆大学学报,1994,17(5): 115-120.
- [5] 汤兵勇,路林吉,王文杰. 模糊控制理论与应用技术[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [6] 高琴妹. 参数在线自校正模糊控制器[J]. 电气自动化, 2000,22(6): 25-26.
- [7] 郭刚,朱建坤. 模糊和PID结合的控制器的设计方法[J]. 仪表技术与传感器,1997,(3): 43-44.

## The Research and Simulation of the Fuzzy—PID Control System for Ball Mill Pulverizing of Power Plant

LI Gang , WANG Guang-jun

(College of Power Engineering, Chongqing University , Chongqing 400030, China)

**Abstract:** This paper focuses on the main problems in the operation control for ball mill pulverizing system, proposes the dynamic mathematical model for the steel ball mill pulverizing system, simulates and analyzes the dynamic character of the system. A Fuzzy - PID controller with on - line self - tuning parameters based on fuzzy control technology is proposed. The simulation results show that the Fuzzy - PID control system can improve the controlling effect and the ability of suppressing disturbances.

**Key words:** ball mill pulverizing system; fuzzy logic; intelligent control; simulation

(编辑 陈移峰)

(上接第 106 页)

## Advance in Spray Forming Technology and Its Prospect

WANG Wen-ming<sup>1</sup>, PAN Fu-sheng<sup>1</sup>, LU Yun<sup>2</sup>, ZENG Su-min<sup>3</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Faculty of Engineering, Chiba University, Chiba, Japan;

3. Southwest Aluminum Industry (Group) Company, Ltd., Chongqing 401326, China)

**Abstract:** Spray Forming technology gets involved with new materials preparation techniques in multiple domains such as powder metallurgy, fluent metal atomization, rapid cooling and non - equilibrium solidification. High performance alloy and metal matrix composite with high density, low oxygen content and microstructure featuring rapid solidification can be fabricated by spray forming. Spray forming, which is of short process flow, low cost, high deposition efficiency, flexible manufacture system, becomes a kind of near shape forming and rapid solidification technology with great prospect. Therefore the developing process history of spray forming technology is introduced and the current research and development status of spray forming technology in the fields of aluminum alloy, steel material, magnesium alloy, copper alloy and high temperature alloy and metal matrix composite is described. Multi - layer spray forming and in - situ reaction atomization spray forming are also discussed. In addition, evaluation and prospect for the technology are presented.

**Key words:** spray forming; rapid solidification; evaluation; prospect

(编辑 陈移峰)