

文章编号: 1006—155X(2001)03—106—07

汽包锅炉燃烧过程的模糊 PID 控制

邱 华¹, 刘 锋², 谭季麓³

(1. 华中电力集团公司计划发展部, 湖北 武汉 430077; 2. 武汉大学水利水电学院, 湖北 武汉 430072;
3. 中国地质大学数理系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 根据采用直吹式制粉系统汽包锅炉燃烧过程的特性, 设计了模糊 PID 算法. 通过对主汽压力实际输出曲线的识别, 修正 PID 控制参数 K_p 和 T_i , 使被控对象输出符合期望的动态响应过程. 模糊 PID 控制系统通过实际应用, 取得了预期的控制品质.

关键词: 模糊 PID 控制; 燃烧过程; 负荷分配

中图分类号: TP 273⁺.4 **文献标识码:** A

锅炉燃烧过程自动控制的基本任务是使燃料所提供的热量适应锅炉蒸汽负荷的需要, 同时还要保证锅炉安全经济运行. 每台锅炉燃烧过程的具体控制任务及控制系统的选择因燃料种类、制粉系统、燃烧设备以及锅炉的运行方式不同而有区别. 负荷适应能力和主汽压力稳定的矛盾一直是热力发电机组自动控制中有待于进一步解决的问题, 尤其对于具有直吹式制粉系统的锅炉来讲, 就更为突出. 在直吹式制粉系统中, 磨煤机与锅炉紧密地联系在一起. 在稳定运行时, 进入磨煤机的原煤量等于送入炉膛的煤粉量, 并要求与负荷相适应^[1]. 调节进入磨煤机的原煤量就等于调节进入炉膛的煤粉量, 用原煤量作为控制变量. 以往的控制系统设计对于主汽压力的控制采用常规 PID 算法. 当煤质或机组负荷发生变化, 常规的 PID 控制效果往往不太理想. 近几年, 随着模糊控制的发展, 出现了将模糊控制规则和 PID 算法结合在一起的模糊 PID 的算法, 该算法根据偏差及偏差变化率对比例系数 K_p 、积分时间 T_i 和微分时间 T_D 加以调整, 如果被控过程动态特性发生变化, 则对控制效果有影响, 而且模糊控制规则的选取要经过反复试验和修改.

本文提出的模糊 PID 算法是根据对控制品质的期望即最大偏离量 C_m 和衰减比 η 用来作为调节 PID 控制参数的依据.

1 模糊 PID 算法

常规的控制系统采用 3 个调节器改变 3 个流量: 燃料量、送风量和引风量. 它们各自相应地维持 3 个被调量: 汽压、过剩空气系数和炉膛负压. 当负荷变化时, 这 3 个调节器协调动作, 共同完成上述 3 项任务^[2].

模糊 PID 算法是根据用户对控制品质的期望, 即最大偏离量 C_m 、衰减比 η 和调节时间 t_s 作为调节 PID 控制器参数: 比例系数 K_p 、积分时间 T_i 和微分时间 T_D 的依据, 符合人们对过程的判断和推理, 原理框图如图 1 所示. 自学习调整的目的是使被控对象在不同的工况下, 处于高品质控制状态, 而且根据用户对控制性能的要求, 在线调整.

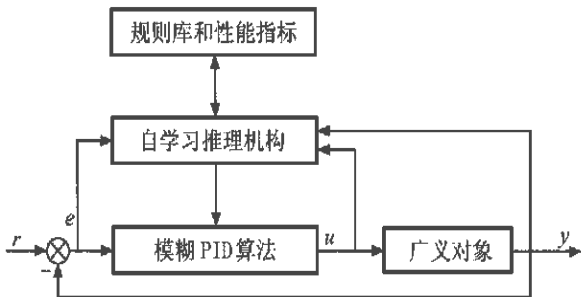


图 1 模糊 PID 控制系统原理框图

收稿日期: 2000—12—13

作者简介: 邱 华(1965—), 男, 湖北武汉人, 高级工程师, 从事控制理论技术在电站的应用等工作.

1.1 性能指标

根据锅炉运行规程的规定以及对主汽压力控制品质的期望,本文采用如下性能指标:

(1)最大偏离量 C_m

$$C_m = |C_1 - C_{ss}|$$

(2)衰减比 η

$$\eta = \frac{C_1 - C_3}{C_1} = 1 - \frac{C_3}{C_1}$$

采用上述经典性能指标,其最大特点是直观地反映了响应曲线的特征如图 2. 既便于作为调整控制参数的依据,又便于用户提出自己的期望目标,并观测验证.

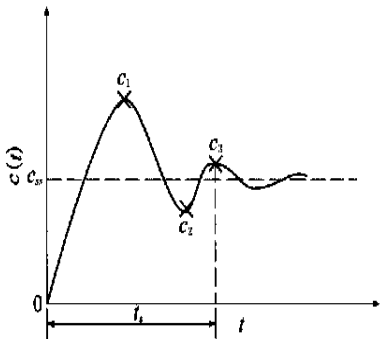


图 2 闭环控制系统输出响应曲线

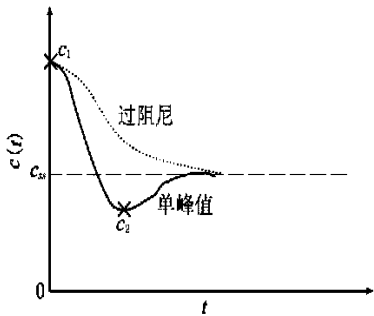


图 3 过阻尼、单峰值响应

1.3 自学习规则及算法

自学习规则以整定出符合期望的最大偏离量 C_m 和衰减比 η 性能指标作为目标. 其关键是在衰减振荡的响应区域, 此时可快速将波形调整到理想状况. 其他三种响应一般认为是非理想的, 其中过阻尼和单峰值响应调节时间过长, 动态特性不理想; 而临界和发散振荡响应由于不稳定, 对生产过程来说是非常危险的. 另外, 这三种响应, 特别是前两种, 难以用最大偏离量和衰减比准确描述, 为此, 需通过定性粗调, 使系统响应产生衰减振荡, 然后

1.2 自学习推理机构

自学习推理机构以经典性能指标为基础, 通过对系统输出响应进行分类, 根据用户要求及响应特征进行处理, 最后决定是否进行 K_p 和 T_I 的自不学习调整, 以及采用哪类自学习规则.

启动自学习工作的推理依据有两个基本条件: 第一, 刚进入控制状态, 初值选取后要验证是否满足要求, 并进行重新整定; 第二, 当系统不满足要求, 性能指标下降到一定程度时, 说明系统出现异常变化(如给煤机故障或机组负荷变化较大等), 此时不进入自学习调整. 此外, 推理机构不仅要监督系统的运行, 还要采用有效可行的算法进行响应波形的识别和分类(见图 3 和图 4), 提供选用自学习规则的直接依据^[3].

具体波形的划分和判别依据为

- ①过阻尼响应: $C_1 \neq 0, C_2 = 0, C_3 = 0$;
- ②单峰值响应: $C_1 \cdot C_2 < C_3 = 0$;
- ③衰减振荡响应: $C_1 \cdot C_2 < 0, C_2 \cdot C_3 < 0$, 且 $\eta > 0$;
- (4) 临界和发散振荡响应: $C_1 \cdot C_2 < 0, C_2 \cdot C_3 < 0$, 且 $\eta \leq 0$.

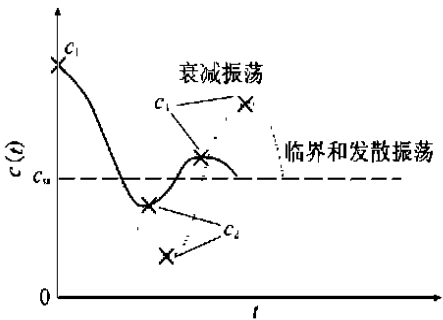


图 4 衰减、临界和发散振荡响应

再细调, 达到用户的要求.

这里将 α, β 作为修正因子, 调整后的 PI 参数为

$$K_p' = \alpha \cdot K_p, T_I' = \beta \cdot T_I$$

(1)衰减振荡响应波形的自学习规则

设 $\Delta C_m = C_m - C_{m0}, \Delta \eta = \eta / \eta_0, C_{m0}$ 和 η_0 分别为用户设定的最大偏离量和衰减比. 根据被控对象的动态特性将 ΔC_m 和 $\Delta \eta$ 划分为几挡, 得出 α 和 β 的查询见表 1.

表 1 振荡衰减响应的自学习查询表

$e_2 \leqslant$	$e_1 \leqslant \Delta C_m$	$0 \leqslant \Delta C_m$	$\Delta C_m < 0$
ΔC_m	$< e_2$	$< e_1$	
<hr/>			
$\Delta \eta < d_2$			
$d_2 \leqslant \Delta \eta < d_1$	$\alpha = k_{1i}$		
$d_1 \leqslant \Delta \eta < 1.0$	$\beta = k_{2i}$		
$1.0 \leqslant \Delta \eta$			
<hr/>			

表中, $0 < e_1 < e_2, 0 < d_1 < d_2 < 1, i = 1, 2, 3, 4, j = 1, 2, 3, 4, k_{1ij} > 0, k_{2ij} > 0$ 根据调试经验得出:

当 i 一定时, $k_{1ij} \leq k_{1i(j+1)}, k_{2ij} \leq k_{2i(j+1)}, j = 1, 2, 3;$

当 j 一定时, $k_{1ij} \geq k_{1(i+1)j}, k_{2ij} \geq k_{2(i+1)j}, i = 1, 2, 3.$

(2)过阻尼响应波形的自学习规则

对于无超调响应,说明系统上升速度不够快.

此时,应注重系统的动态响应,加大积分作用,具体规则如下:

$$\alpha \geq 1.0, \beta < 1.0$$

(3)单峰值响应波形的自学习规则

对于单峰值响应,此时反应速度尚不够迅速,应注重系统的动态响应,可适量加大积分作用,具体规则如下:

$$\alpha \geq 1.0, \beta < 1.0$$

(4)临界和发散振荡响应波形的自学习规则

这种响应说明反应过甚,积分作用过大;其积分作用基本恰当时,太小的比例作用也是造成这种响应的原因之一,具体规则如下:

$$\alpha \geq 1.0, \beta \geq 1.0$$

2 模糊 PID 算法在主汽压力控制中的应用

主汽压力控制系统的原理框图如图 5.

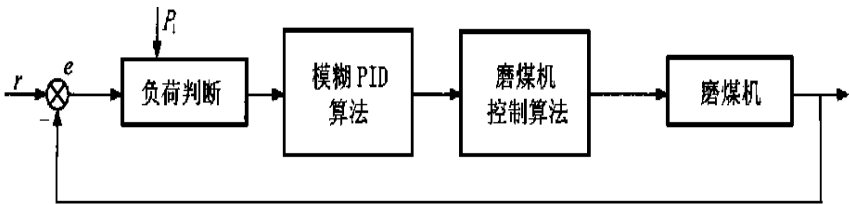


图 5 主汽压力的模糊 PID 控制系统原理框图

2.1 机组负荷判断

在这里取汽机第一级压力 P_1 作为判断机组负荷的依据,具体规则如下:

- ① 若 $k_1 \leq P_1$, 则负荷在 90% ~ 100%.
- ② 若 $k_2 \leq P_1 < k_1$, 则负荷在 80% ~ 90%.
- ③ 若 $k_3 \leq P_1 < k_2$, 则负荷在 70% ~ 80%.
- ④ 若 $k_4 \leq P_1 < k_3$, 则负荷在 60% ~ 70%.

其中, $K_1 > K_2 > K_3 > K_4 > 0$ 且根据具体情况设定.

2.2 模糊 PID 控制算法

主汽压力控制系统的模糊 PID 控制算法由两个部分组成,一是变负荷控制部分 $y_1 = k \frac{dP_1}{dt}$, 另一部分是模糊 PID 控制部分 $y_2 = K_p[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t)dt]$, 其总输出为 $y = y_1 + y_2$. 其中, e 为主汽压力 P_T 和定值 P_0 的偏差 $P_0 - P_T$.

当单元机组根据电网要求改变负荷时,多采用改变汽机调节门开度的方式. 因调节级压力 P_1 能

够对此作出迅速反应,所以,用 P_1 作为锅炉燃料控制的前馈,能够使燃料控制系统及时响应机组负荷变化. 从锅炉内扰来看,当燃烧率自发增加时,主汽压力 P_T 和调节级压力 P_1 均升高,故还要考虑锅炉侧扰动对 P_1 的影响. 一般来说,机组升/降负荷对 P_1 的影响远大于锅炉侧扰动带来的变化,所以,可根据 P_1 变化的幅度来判断是机组负荷变化还是锅炉侧扰动. 其控制算法可表示为

$$y_1 = \begin{cases} k \frac{dP_1}{dt}, & \left| \frac{dP_1}{dt} \right| \geq \lambda \\ 0, & \left| \frac{dP_1}{dt} \right| < \lambda \end{cases}$$

常数 λ 作为是否对 P_1 变化作出燃料增减的判断标准,不同机组 λ 值不同,可根据机组运行参数确定. 这样,可避免锅炉侧燃烧扰动对 P_1 前馈量的干扰.

y_2 式中的 K_p 和 T_I 将由修正因子 α, β 作调整,具体自学习规则如下:

① 衰减振荡响应波形的 α 和 β 见表 2.

表 2 误减振荡响应波形的 α 和 β 查询表

	$0.1 \leq \Delta C_m$	$0.05 \leq \Delta C_m < 0.1$	$0 \leq \Delta C_m < 0.05$	$\Delta C_m < 0$
$\Delta \eta < 0.5$	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 0.85$	$\alpha = 1.05$	$\alpha = 1.10$
	$\beta = 1.00$	$\beta = 1.00$	$\beta = 1.25$	$\beta = 1.25$
$0.5 \leq \Delta \eta < 0.8$	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 0.85$	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 1.00$
	$\beta = 1.00$	$\beta = 1.00$	$\beta = 1.00$	$\beta = 1.00$
$0.8 \leq \Delta \eta < 1.0$	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 0.85$	$\alpha = 0.95$	$\alpha = 1.00$
	$\beta = 1.00$	$\beta = 1.00$	$\beta = 1.00$	$\beta = 1.00$
$1.0 \leq \Delta \eta$	$\alpha = 0.75$	$\alpha = 0.85$	$\alpha = 0.95$	$\alpha = 1.00$
	$\beta = 0.85$	$\beta = 0.95$	$\beta = 1.00$	$\beta = 1.00$

②过阻尼响应波形的 α 和 β ,
 $\alpha = 1, \beta = 0.75$

③单峰值响应波形的 α 和 β ,
 $\alpha = 1, \beta = 0.85$

④临界和发散振荡响应波形的 α 和 β ,
 $\alpha = 1.4, \beta = 1.25$

2.3 磨煤机负荷分配

一般来讲,采用一台直吹式制粉系统的磨煤机负责锅炉一层喷燃器的煤粉供应.由于锅炉燃烧受各角煤粉量多少的影响,一般要求对角的给粉量不能相差太大,避免造成锅炉燃烧不稳.原煤潮湿结

块造成落煤管堵塞或煤机故障使磨煤机断煤或间断给煤的情况经常发生,会造成磨煤机入口负压增大,锅炉内烟气含氧量增大,燃烧不稳定.所以,根据各磨煤机不同的状态和所处的位置,分配不同的负荷量.总的原则是:在机组负荷不变的运行工况下,如果没有给煤自扰和制粉系统切换,则由一台磨煤机承担主汽压力的调节任务;在机组负荷变化或发生给煤自扰、制粉系统切换的情况时,由所有磨煤机共同维持主汽压力的稳定.负荷分配的原理框图如图 6.

根据变负荷控制输出 y_1 、PID 控制输出 y_2 、操

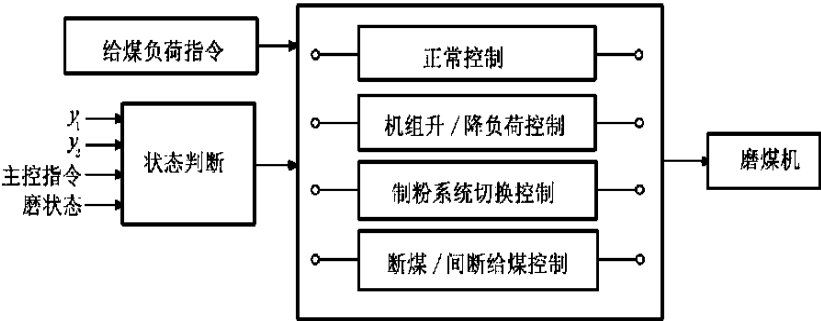


图 6 负荷分配原理

作人员提供的主控磨煤机指令和各磨煤机状态来确定采用何种控制算法:

(1)正常控制

如果 $y_1 = 0$, y_2 小于某一值而且没有磨煤机正启动和停止时,将给煤增减控制指令 y 加到操作人员指定的磨煤机上.

(2) 机组升 / 降负荷控制

如果 $y_1 \neq 0$ 时,说明此时机组正在升/降负荷.这时,用一台磨是不能满足机组负荷需要的,需要调整正在运行的所有磨的给煤量.

(3)制粉系统切换控制

根据各磨煤机状态(如磨电流、给煤机电流等)

来确定是否正在切换制粉系统.此时,相应改变其他各磨煤机的给煤量去弥补这一扰动.

(4)断煤/间断给煤控制

如果机组没有升/降负荷、也没有制粉系统正在切换,而主汽压力突然变化很大, y_2 就会变大,说明给煤有扰动.如果是由于给煤机故障,则很快可从给煤机电流反映出来;如果是由于别的原因(如原煤结块等)只有通过一段时间才能从磨煤机电流和磨煤机出口温度判断出来.此时,由给煤正常的磨煤机共同进行调节,尽量补偿给煤异常带来的扰动,并进行报警,提醒运行人员处理故障.

3 实际应用与分析

3.1 控制系统构成

该专家模糊 PID 控制系统应用于某电厂 100 MW 4 套直吹式制粉系统中,系统的结构框图如图 7 所示.

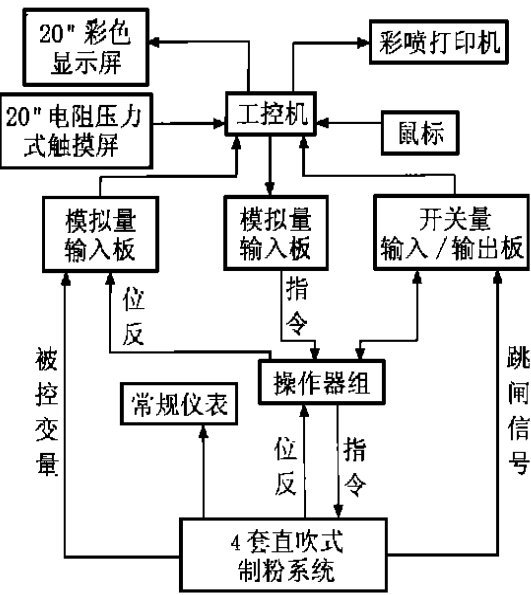


图 7 控制系统结构图

本套专家模糊 PID 控制系统软件是基于 Win-dows 95 平台、借助于 Visual Basic 开发工具开发的全汉字图形界面的实时监控系統,包括中文视窗、

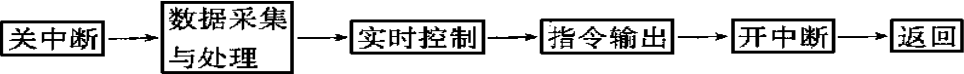


图 9 中断服务程序

3.2 自动控制系统的功能

- 模糊控制系统主要完成以下功能:
- (1)数据采集、处理和存储.采集制粉系统及相关的模糊量和开关量信号并进行相应的滤波和工程转换,存入数据库中.
 - (2)监控画面.报表显示采集的模拟量值、开关量状态及所对应的名称、单位和报警状态;棒图显示各制粉系统的指令输出、设定值及测量值;流程图显示制粉系统的工艺流程和过程参数;趋势图可以显示各参量的运行曲线;运行设定可以由运行人员输入一些运行状态、指令等.
 - (3)历史记录.可以追忆前一段时间的制粉系统运行参数.
 - (4)手动/自动切换.当制粉系统处于手动状态时,计算机跟踪操作器输出,因此在切入自动时可

实时数据采集、专家模糊 PID 控制算法、自动控制输出等.

①主程序流程(如图 8).

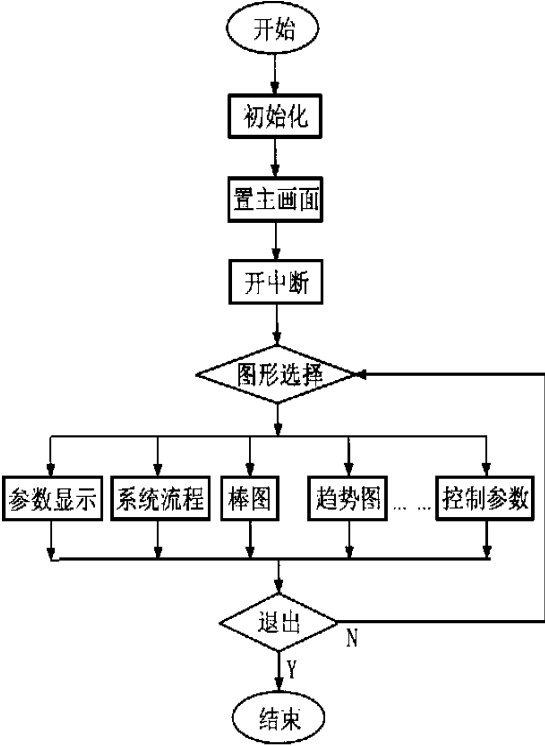


图 8 主程序流程图

②中断服务程序(如图 9).

③实时控制程序(如图 10).

- 以实现无扰;当制粉系统处于自动状态时,计算机输出的自动指令是经过操作器再送至执行机构,同样在切为手动时实现无扰.制粉系统的手动/自动切换可以在触摸屏上操作实现或者用鼠标进行,也可通过操作器的状态切换按键来完成.
- (5)报警功能.当制粉系统各参量越限、运行情况异常时,及时发出声光报警,提醒运行人员注意,必要时进行人工干预.
- (6)打印功能.采用定时打印,能够打印计算机中存储的有关制粉系统的各种参数,同时也具有屏幕拷贝功能.
- (7)负荷分配.根据制粉系统运行状态,通过模糊推理确定各磨煤机合理的给煤指令.
- (8)测量参数的在线修改.无需用专门的总列表来修改各种 I/O 参数,只需在任一动态显示测量

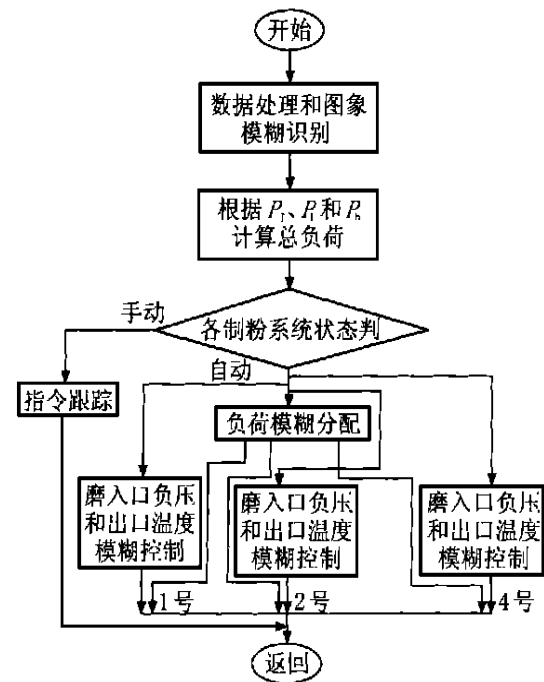


图 10 实时模糊控制子程序

点数值的画面中用鼠标双击或在触摸屏上点击该

表 3 自学习调整记录

机组负荷	初 始 值				最 终 结 果			
	K_p	T_1	C_m	η	K_p	T_1	C_m	η
90%~100%	0.60	250	0.22	0.78	0.58	250	0.09	0.81
80%~90%	0.50	200	0.23	0.66	0.42	200	0.13	0.79
70%~80%	0.40	20	0.26	0.81	0.38	200	0.11	0.78
60%~70%	0.30	200	0.25	0.61	0.35	210	0.16	0.82

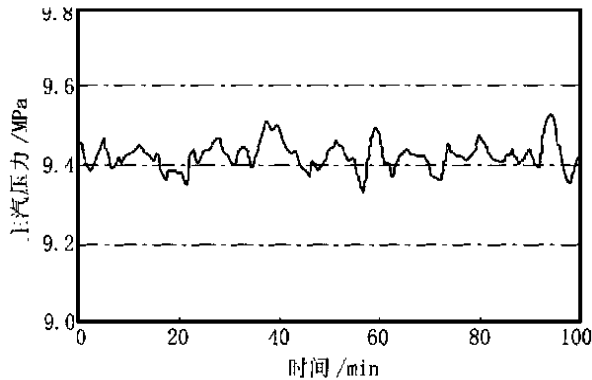


图 11 采用模糊 PID 控制算法的主汽压力运行曲线

实际应用表明,模糊 PID 控制算法在改善被控过程的动态、稳定性能和提高抗干扰能力以及对参数时变的适应能力等方面均优于常规 PID 调节器,

点,则弹出该点的参数设置表,进行名称、量程、报警限等的修改.

(9)多种控制方式.根据运行的要求和不同情况,如磨煤机断煤、堵塞、机组升/降负荷、制粉系统切换、启停等,由运行人员确定各制粉系统的手/自动状态,从而进行多种组合的控制方式,即各制粉系统相对独立,控制程序根据投入自动状态的制粉系统的台数,而相应地分配负荷;在同一制粉系统中,也可实现各控制量的手/自动多种状态的控制,即给煤、热风 and 冷烟三个输出指令任何一项在自动状态都可进行制粉系统的自动控制.

3.3 技术经济分析

模糊 PID 控制系统在实际应用时,针对期望的最大偏离量 C_m 和衰减比 η ,对不同机组负荷下相应的 PID 参数进行自学习调整,经数次自学习调整最终收敛到目标值见表 3,具体目标为

$$C_m \leq 0.2 \text{ MPa}, \eta \geq 75\%$$

采用模糊 PID 控制算法的主汽压力控制系统的运行曲线和采用常规 PID 算法的控制曲线对比如图 11 及图 12.

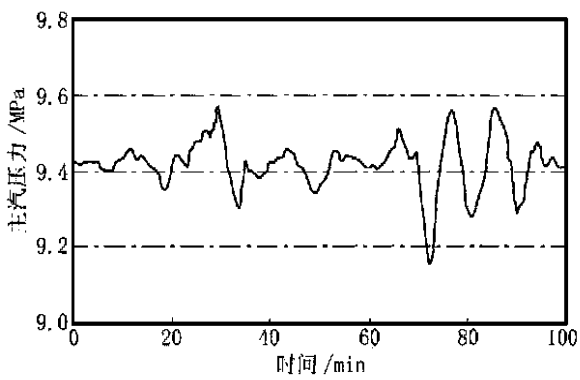


图 12 采用常规 PID 控制算法的主汽压力运行曲线

对进一步提高采用 PID 控制规律的过程控制质量具有很大的实际意义.而且,由于采用了负荷分配的方法,提高了锅炉燃烧的稳定性的.

4 结束语

负荷适应能力和主汽压力稳定的矛盾一直是热力发电机组自动控制中有待于进一步解决的问题,尤其对于具有直吹式制粉系统的锅炉来讲,就更为突出.为此提出模糊 PID 算法,克服了常规主汽压力 PID 调节中响应速度慢,适应机组负荷能力差,调节品质差的缺点,不但提高了主汽压力的自动调节品质和不同机组负荷的适应性,而且也提高了自动控制系统的抗干扰能力.采用负荷分配的方

法,将不同位置和运行状况的磨煤机分配以相应的给煤量,以保证锅炉燃烧的稳定性,同样取得了理想的效果,达到了预期的目标.

参考文献:

[1] 王诗宓.多变量控制系统的分析和设计[M].北京:中国电力出版社,1996.
[2] 张玉铎,王满稼.热工自动控制系统[M].北京:水利电力出版社,1985.
[3] 李士勇.模糊控制·神经控制和智能控制论[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1996.

Research on fuzzy PID control of combustion process for drum boiler

QIU Hua¹, LIU Feng², TAN Ji-lu³

(1.Division of Planning and Development, Central China Electric Power Group Corporation, Wuhan 430077, China;
2.School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3.Department of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract:According to the characteristics of combustion process for drum boiler with the direct firing of pulverizing mill, fuzzy PID algorithms have been proposed. Through the identification of the output curves of main steam pressure, K_p and T_I of PID parameters would be adjusted and the controlled process would meet the desired dynamic response. The fuzzy PID control system has been implemented and acquires desired control quality.
Key words:fuzzy PID control; combustion process; load distribution