

循环流化床锅炉燃烧系统的 多模态仿人智能控制

冯茜¹, 王磊²

(1. 河北联合大学 机械工程学院, 河北 唐山 063009; 2. 河北联合大学 组织部, 河北 唐山 063009)

摘要: 针对循环流化床锅炉燃烧被控对象的非线性、时变、大滞后及多变量强耦合的特点, 将基于多模态仿人智能控制的解耦控制策略应用于该系统中; 根据智能逻辑选择回路的逻辑信号, 对相应的仿人智能模糊控制器进行选通, 从而实现主蒸汽压力和床体温度之间的动态解耦; 仿真结果证明, 该策略基本上消除了主蒸汽压力和床体温度之间的耦合, 响应曲线过渡平稳, 响应较快, 能收到良好的控制效果; 为解决循环流化床锅炉燃烧控制参数强耦合问题提供了一种新的尝试和途径。

关键词: 循环流化床锅炉; 多模态; 仿人智能控制; 仿人智能模糊控制

Multi Modal Human—Simulated Intelligent Control of Circulating Fluidized Bed Boiler Combustion System

Feng Qian¹, Wang Lei²

(1. College of Mechanical Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China;

2. Section of Organization, Hebei United University, Tangshan 063009, China)

Abstract: This paper takes the combustion system of circulating fluidized bed boiler as the research object. According to the characteristics of nonlinear, time-varying, large delay and multivariable strong coupling, we put forward decoupling control strategy based on multi modal human—simulated intelligent control strategy. According to the logic signal of intelligent logic selection circuit, it selected the corresponding human—simulated intelligent fuzzy control, so as to realize the dynamic decoupling between the main steam pressure and bed temperature. The simulation results showed that the method basically eliminated the coupling between the main steam pressure and bed temperature, the response curve transition smooth, quick response and receive the good control effect. The algorithm attempted to provide a new way to solve strong coupling problems of parameters in the circulating fluidized bed boiler combustion control.

Keywords: circulating fluidized bed boiler; multi—modal; human—simulated intelligent control; human—simulated intelligent fuzzy control

0 引言

循环流化床锅炉具有燃料适应性广、燃烧效率高、负荷调节范围宽及经济效益好等优点, 作为一种新型清洁燃煤锅炉, 目前已经在发电、供热等方面得到了广泛的应用^[1]。循环流化床锅炉是一个分布参数、大滞后、时变、多变量紧密耦合的控制对象, 其结构复杂, 控制任务多, 实时性强, 因此, 实现循环流化床锅炉燃烧系统的自动控制相当困难。

为使结构简单, 造价低, 我国当前运行的循环流化床锅炉大多没有采用外置式换热器, 其主蒸汽压力和床体温度均通过调节给煤量和一次风量来实现^[2]。而主蒸汽压力和床体温度是具有紧密关系的强耦合变量, 当主蒸汽压力和床体温度两者中任何一个出现偏差时, 无论调节给煤量还是送风量都会使另一个量发生变化。要使两个变量都得到精确控制几乎是不可能的。国外常见的方法一般是以主蒸汽压力控制为主, 按最佳风煤比的原则来调节一次风量, 同时控制床体温度在所要求的范围内^[3-5]。

因此, 本文提出了基于仿人智能控制理论的多模态控制方法。该方法具有以下特点: 1) 控制系统的设计不需要对象模型、方法简单、便于工程应用, 特别适用于对象模型难以确定, 而又需要实现解耦控制的情况; 2) 能对多变量系统实行有效的动态解耦控制; 3) 仿人智能模糊控制算法适用于大滞后、强耦合、时变及非线性过程。

1 循环流化床锅炉的多模态仿人智能控制方案

因为锅炉主蒸汽压力和床温的控制均是通过调节给煤量和送风量来实现的, 当主蒸汽压力和床体温度两者中任何一个出现偏差时, 无论调节给煤量还是送风量都会使另一个量发生变化, 这样使得主蒸汽压力和床温成为具有紧密关系的强耦合变量。理想的控制系统应该是多回路的控制系统, 当系统受到某一扰动时, 所有的被调量同时协调动作, 使所有的被调量都具有一定的控制精度。但是这样的调节是很困难的, 要使所有的耦合变量都得到精确的控制是不可能的。

通过现场考察发现, 经验丰富的操作人员能利用一些成熟、非精确化的经验实现对燃烧过程的良好控制^[6-7]。在本文中, 充分考虑了循环流化床锅炉燃烧系统主蒸汽压力和床温间的耦合关系, 结合现场成熟的操作经验, 根据仿人智能控制的

收稿日期: 2013-12-30; 修回日期: 2014-03-20。

作者简介: 冯茜(1980-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事生产过程控制和智能控制方面的研究。

思想,设计了多模态仿人智能控制方案。即先不对主蒸汽压力和床温解耦,而是将二者放在一起控制,通过智能逻辑回路对主蒸汽压力和床温的偏差和偏差变化率进行分析和判别后,选通相应的仿人智能模糊控制器,被选通的仿人智能模糊控制器将直接作用于控制对象并对控制对象进行调节。

在循环流化床锅炉燃烧系统中,一次风量的调节范围是有限的,一次风量过大,会严重增加对炉内设备的磨损,也会影响燃尽度;一次风量最少不能低于临界流化风量,否则易发生炉内结焦。另外,当主蒸汽压力发生改变时,一般使用给煤量的调节使主蒸汽压力保持稳定,但是从节能角度考虑,给煤量的增加会提高成本,因此,在允许的条件下可以考虑通过一次风量的调节来实现主蒸汽压力的控制。基于以上分析,可以进行仿人智能协调控制部分的逻辑智能选择回路的设计。

针对主蒸汽压力和床体温度调节,本文设计了一种基于多模态控制的智能解耦系统。首先,我们将主蒸汽压力和床体温度分别以给定值为中心,划分成正偏差区和负偏差区。如图 1 所示,图中, ΔT_+ 、 ΔT_- 分别表示床体温度的正、负偏差值, ΔP_+ 、 ΔP_- 分别表示主蒸汽压力的正、负偏差值,图中的阴影区域为主蒸汽压力和床体温度的正常运行区域。然后,我们将主蒸汽压力和床体温度的区间进行组合,形成判别条件。最后,根据主蒸汽压力和床体温度落在不同区域来确定是用加煤量进行控制还是用一次风量进行控制,也就是决定具体用哪一个仿人智能控制器进行控制,此回路的输出信号将送至逻辑智能回路。整个控制系统包括 4 个独立的控制回路:给煤量与主蒸汽压力控制回路、给煤量与床体温度控制回路、一次风量与主蒸汽压力控制回路、给煤量与床体温度控制回路。这 4 个控制回路均采用仿人智能模糊控制算法,将主蒸汽压力和床体温度调节在各自的正常范围之内。

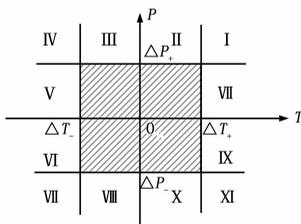


图 1 主蒸汽压力和床体温度分布图

多模态仿人智能控制系统根据来自智能逻辑选择回路的逻辑信号,选通相应的仿人智能模糊控制器进行控制。所有的仿人智能模糊控制器均模仿有经验的操作人员的控制决策思想,采用仿人智能模糊控制算法来进行控制。循环流化床锅炉燃烧系统的多模态仿人智能控制原理如图 2 所示,其中 P_0 表示主蒸汽压力给定值, T_0 表示床温给定值。

2 仿人智能模糊控制

仿人智能模糊控制^[8-9]是用智能算子(包括数学算法与直觉逻辑推理)来仿效或近似模拟人的控制行为,设计出智能控制器。仿人智能模糊控制算法是基于模糊逻辑并将仿人智能有机融和的一种设计方法,采用“观察→控制→等待→再观察→再控制→再等待”方法,当误差及误差变化率往绝对值变大的方向变化时,控制器加以闭环控制;当误差及误差变化率往绝

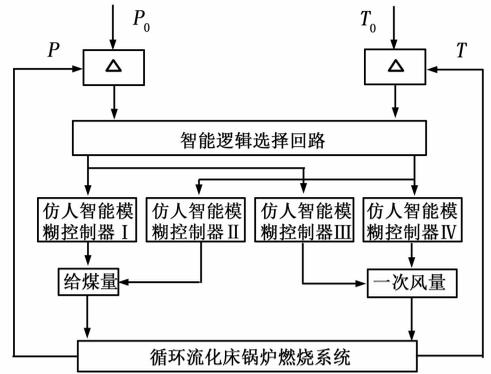


图 2 多模态仿人智能控制原理图

对值变小的方向变化时,控制器加以开环控制。

如果采用多模态的控制方式,根据系统所处的不同状态和控制过程的不同时间的不同要求,采取不同的控制策略和相应的控制模式,就有可能同时兼顾控制系统对多种性能指标的要求。因此,我们采用不同控制方式分段实现控制:

- 1) 当偏差大于某阈值时,用比例控制,以提高系统的响应速度,加快响应过程;
- 2) 当偏差减小到阈值以下时,切换输入模糊控制,以提高系统的阻尼性能,减小响应过程中的超调。

这样就综合了比例控制和模糊控制的优点。在这种方法中,模糊控制的论域仅是整个论域中的一部分,这就相当于模糊控制论域以被压缩,所以这也就等效于模糊控制的语言变量的语言值即分档数增加,提高了控制的灵敏度和精度。

在本文所应用的仿人智能模糊控制子系统中,主蒸汽压力和床温给定值与实际值的偏差 E 和偏差变化率 EC 可完整地表达系统的运动特性,选它们为输入量论域,给煤量或一次风量变化量 ΔU 为输出量论域。实际工程中, E 、 ΔE 和 ΔU 有确定的连续变化范围 $[X_1, X_h]$,在模糊控制中,按下式将它们化为 $[-n, +n]$ 之间的离散论域:

$$Y = [2n / (X_h + X_1)] [X - (X_h + X_1) / 2],$$

$$X \in [X_1, X_h], Y \in [-n, +n] \quad (1)$$

其中: n 为量化等级,本文取 $n=3$,即 E 、 EC 及 ΔU 均按下述等级进行量化:

$$\{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$$

E 、 EC 及 ΔU 的模糊集均定义为: $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$

E 和 EC 及 ΔU 的隶属函数均取为高斯函数,分析循环流化床锅炉燃烧过程并总结实际操作经验,可归纳出控制规则如表 1 所示。

表 1 给出 $7 \times 7 = 49$ 条控制规则,每条可写成:

$$\text{IF } E_i \text{ And } EC_j \text{ Then } \Delta U_{ij},$$

$$i = 1, 2, \dots, 7; j = 1, 2, \dots, 7 \quad (2)$$

由仿人智能模糊控制规则表可以查出对应的给煤变化量或一次风变化量为 ΔU_{ij} ,利用加权平均法清晰化得到的实际给煤量或一次风量为 ΔU ,

$$U = U' + \Delta U \quad (3)$$

其中, U 为本次控制量, U' 为上一次的给煤量或一次

风量。

表 1 仿人智能模糊控制规则表

ΔU \ E	EC	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB		PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NM		PB	PM	PM	PS	PS	ZE	ZE
NS		PM	PM	PM	PS	ZE	ZE	NS
ZE		PM	PM	PS	ZE	NS	NS	NM
PS		PS	PS	ZE	NS	NS	NS	NM
PM		PS	ZE	NS	NM	NM	NB	NB
PB		ZE	ZE	NS	NM	NM	NB	NB

3 系统仿真及结论

为仿真方便, 选取国产 75 t/h 循环流化床作为研究对象, 其在 70%~100% 负荷范围内的传递函数矩阵^[10-11]为:

$$\begin{bmatrix} T_b \\ P_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ Q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.386}{(180s+1)^2} e^{-30s} & -\frac{8.8767}{(163s+1)^2} \\ \frac{0.0066}{(260s+1)^2} e^{-60s} & \frac{0.036(940s-1)}{(10s+1)(160s+1)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ Q_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, T_b, P_0 分别为床温、主蒸汽压力; B, Q_1 分别为给煤量、一次风量。

此时, 利用 Simulink^[12] 对循环流化床锅炉燃烧系统的多模态仿人智能控制进行仿真。当给煤量为 0 时, 一次风量为单位阶跃信号时, 床温和主蒸汽压力曲线如图 3 所示。其中, 曲线 1 为床温曲线, 曲线 2 为主蒸汽压力曲线。一次风量为 0 时, 给煤量为单位阶跃信号时, 主蒸汽压力和床温曲线如图 4 所示。其中, 曲线 1 为主蒸汽压力曲线, 曲线 2 为床温曲线。通过仿真, 可以发现, 从循环流化床锅炉燃烧系统反馈回来的数据每次都要进入智能逻辑选择回路中进行判断, 被选通的仿人智能模糊控制器直接作用于被控对象, 进而对偏差量进行调节, 很大程度上对有经验的人的行为进行了模仿。仿真结果表明, 基于智能逻辑回路的仿人智能模糊控制达到了较好的解耦控制效果。

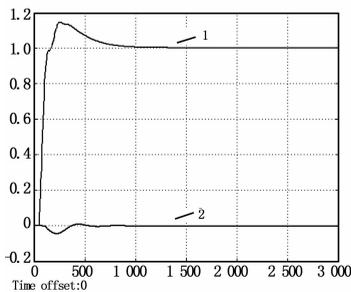


图 3 床体温度和主蒸汽压力曲线 (一次风量为单位阶跃信号)

4 结束语

本文利用仿人智能控制原理, 依据运行人员的经验, 在深入分析对象特性和动态特性的基础上, 针对循环流化床锅炉燃

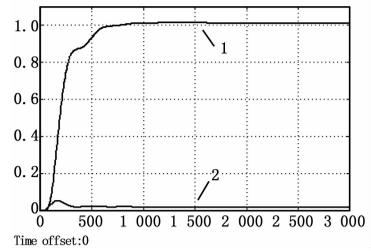


图 4 主蒸汽压力和床体温度曲线 (给煤量为单位阶跃信号)

烧系统设计了基于多模态的仿人智能控制系统, 并且利用 Matlab 进行了仿真试验, 对其仿真结果做出详尽的分析。上述的主蒸汽压力和床体温度解耦控制方案, 能够使被控参数稳定在给定值附近, 具有良好的控制品质。为解决循环流化床燃烧控制参数强耦合问题提供了一种新的尝试和途径, 具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 岑可法, 倪明江, 骆仲映, 等. 循环流化床锅炉理论与运行 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [2] 和秋鹏, 喻寿益. 循环流化床锅炉集散控制系统 [J]. 计算机测量与控制, 2007 (05): 605-607.
- [3] 黄郁南. 循环流化床锅炉的加权模糊控制 [J]. 热电技术, 1997, (2): 1-14.
- [4] 徐天芳. I/A 系列分散控制系统在大型循环流化床锅炉中的运用 [J]. 中国电力, 1997, (11): 48-58.
- [5] 牛培峰. 循环流化床锅炉热工自动控制 [J]. 动力工程, 1998, 18 (6): 39-46.
- [6] 杨景棋, 赵伟杰, 郭 荣, 等. 循环流化床锅炉控制系统的分析与设计 [J]. 动力工程, 2005, 25 (4): 517-522.
- [7] 牛培峰. 大型国产循环流化床锅炉燃烧过程智能控制系统应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (12): 62-66, 71.
- [8] 李祖枢, 涂亚庆. 仿人智能控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 246-258.
- [9] 王耀南. 智能控制系统 [M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1996.
- [10] 工万召, 赵兴涛, 谭 文. 流化床燃烧系统模糊-神经元 PID 解耦补偿控制 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (8): 94-98.
- [11] 马素霞, 杨献勇. 循环流化床锅炉燃烧系统的动态特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (9): 71-76.
- [12] 薛定宇. 控制系统计算机辅助设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

更 正

2014 年 7 期文章《基于稀疏编码和禁忌优化的故障信号抽取方法》中的作者为: 周 晏, 王 璐。

基金项目为国家重大科技专项项目 (2012ZX04011-012)。

《计算机测量与控制》杂志社

2014. 8.