

循环流化床锅炉专家控制系统在 DCS 中的应用

狄利明

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 分析循环流化床锅炉燃烧控制系统运行特性、控制系统特点, 详细阐述了循环流化床锅炉燃烧控制系统的模糊专家控制算法以及在集散控制系统 JX-300X 上的实现. 采用专家控制系统对 75 t/h 循环流化床锅炉燃烧过程进行自动控制后提高了锅炉的控制效果和系统的运行可靠性.

[关键词] 循环流化床锅炉, 燃烧系统, 专家控制, 集散控制系统

[中图分类号] TK 229.6 [文献标识码] B [文章编号] 1672-1292-(2005) 01-0031-04

Application of Circulating Fluidized Bed Boiler Expert Controlling System in DCS

DILiming

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Jiangsu Nanjing 210042, China)

Abstract This paper introduces and analyzes the circulating characteristics of control and operating mode of circulating fluidized bed boiler and the characteristics of the control system, expounds in detail the control strategy of a fuzzy expert control system for combustion of circulating fluidized bed boiler and the system used to configure DCS JX-300X, and describes the control effect and operating reliability of the expert control system after the system is applied to the burning proceeding of 75 t/h circulating fluidized bed boiler.

Key words circulating fluidized bed boiler, burning system, expert controlling, distributed control system

循环流化床技术作为一种清洁燃煤技术, 由于其低污染排放、燃料适应性广、燃烧效率高及负荷适应性强等优点, 得到了迅猛的发展, 循环流化床锅炉也日趋大型化. 虽然循环流化床锅炉, 尤其是中小型循环流化床锅炉已经在许多企业中使用, 但控制问题一直是使用循环床锅炉的主要问题之一, 用常规仪表控制系统的循环流化床锅炉其燃烧自动控制系统基本投不上, 或投入率很低, 实际运行中还靠手动操作. 究其原因, 在于循环流化床锅炉燃烧系统的复杂性. 常规仪表控制系统无法满足先进控制策略的各种复杂控制, 而集散控制系统(DCS)作为一种先进的控制系统使得在循环流化床锅炉的自动控制中实现复杂控制成为可能.

1 循环流化床锅炉燃烧系统的任务与控制特点

由于循环流化床锅炉不同于煤粉炉和燃油锅

炉, 其控制回路多, 系统比较复杂, 控制系统设计一般包括以下主要回路: 汽包水位控制, 过热汽温控制, 燃料控制, 风量及烟气含氧量控制, 炉膛负压控制, 料床温度控制, 料床高度控制, 返料回料控制. 对于汽包水位控制和过热汽温控制特性与通常的煤粉炉和燃油锅炉相同, 而循环流化床锅炉燃烧过程自动控制的基本任务是使燃料燃烧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.

1.1 燃烧控制系统的任务

(1) 维持汽压稳定. 汽压的变化表示锅炉的蒸汽量与负荷的耗汽量不相适应, 需要相应地改变燃料的供应量, 以改变锅炉的蒸汽量.

(2) 保证锅炉燃烧过程的经济性. 改变燃料量的同时, 相应地调节送风量, 使之与燃料量匹配, 保证锅炉燃烧的经济性.

(3) 引风量与送风量相配合以保证炉膛压力

收稿日期: 2004-09-05

作者简介: 狄利明(1959-), 高级实验师, 主要从事自动控制及计算机技术应用的教学与研究. E-mail: diliming@njnu.edu.cn

在正常的范围内, 保证锅炉的安全运行.

(4) 料床温度是一个直接影响锅炉能否安全连续运行的重要参数, 同时也直接影响锅炉运行中的脱硫效率及 NO_2 的生成量. 通常情况下 856°C 床温是炉内脱硫的最佳温度, 同时 NO_2 生成量也较低. 床温过低不但使锅炉效率下降, 而且运行不稳定容易灭火; 床温过高会使脱硫效率下降, NO_2 生成量大大增加, 同时容易造成炉膛料床结焦, 无法正常流化而停炉. 由此可见, 料床温度是循环流化床锅炉运行极为重要的参数.

(5) 料床高度控制也与锅炉安全连续运行密切相关, 料层太厚, 会把一次风的“风头”压住, 使炉料不能达到完全流化状态; 料层太薄, 不仅不满足负荷要求, 而且会使一次风穿透料层吹灭炉火.

(6) 返料回料控制将直接影响锅炉的循环倍率, 同时对床温也有一定的影响.

1.2 燃烧系统的控制特点

循环流化床锅炉 (CFBB) 燃烧方式同常规煤粉炉不一样, 故其燃烧控制方案也不一样. 流化床锅炉要在炉内进行脱硫, 须有给料调节控制系统; 循环流化床锅炉依靠大量的返料携带和传热量, 并增加焦炭粒子在炉内的停留时间, 故须有返料调节控制系统; 循环流化床锅炉正常运行时需要维持一定的料层高度, 这由排渣系统调节控制; 循环流化床的床温根据不同的负荷要维持在某一给定值, 以便能够实现高效脱硫和防止结焦, 须有床温调节控制系统; 循环流化床的一、二次风量的配比同锅炉负荷一一对应, 须有一、二次风调节控制系统, 除此之外, 还有主汽压调节控制系统、主汽温调节控制系统、给水调节控制系统、引风调节控制系统和各种保护系统等.

循环流化床锅炉的燃烧系统为一大滞后、强耦合、多输入多输出的非线性系统, 其动态特性的复杂性使得常规的 PD 控制难以满足运行要求, 尤其是面对主汽压与床温的强耦合, 有时无所适从. 从流化床锅炉燃烧系统的运动特点分析, 其控制的复杂性在于各个变量之间相互影响, 有的被调参数同时受到几个调节参数的共同影响, 如床层温度要受到给煤量、一次风量、返料量及排渣量等多个参数控制. 而有的调节参数又影响多个被调参数, 如给煤量影响主汽压力、床温、一、二次风量等参数, 负荷的增加通过加大给煤量来实现, 但却又会同时提高床温, 床温与主蒸汽压力的这种强烈耦合造成了变负荷下使得自动控制系统很难投入. 根据循环流化床锅炉的燃烧特点, 目前燃烧控制系统设计仍主

要采用常规 PID 控制, 通常由燃料控制、总风量控制、一次风控制、二次风控制、燃烧室负压控制、床温控制、料床高度控制、返料回料控制等 8 个有机联系的控制单元构成. 即人为地把被控对象分成许多单变量系统进行控制, 这种控制方法虽然简单、易行, 局部分析是合理的, 但整体考虑会存在许多问题, 对进一步提高自动控制水平将存在很大的局限性, 有的甚至不能满足锅炉的正常运行.

作者等在对一台 75 t/h 循环流化床锅炉的技术改造中, 取得了锅炉运行实际参数, 结合先进控制理论的开发、研究与结累, 提出了应用燃烧控制系统的一种基于操作经验的模糊专家控制算法, 实践于 DCS 控制系统中, 获得良好效果.

2 燃烧控制系统专家知识库的建立

循环流化床锅炉燃烧控制系统专家知识库由控制策略库和规则模型库构成.

2.1 循环流化床锅炉燃烧专家控制策略库的表示方法

循环流化床锅炉燃烧专家控制系统的多模态控制策略库采用控制向量的表示方法, 即:

$$V = [V_i] \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中, V_i 为控制策略库中的各个控制策略; n 为控制策略个数, 控制策略包括解析的、模糊的和知识型的. 由于循环流化床锅炉燃烧控制的影响因素众多, 耦合性强, 因此控制模型中模糊表示与知识表示所占比重较大. 控制策略由相应的控制模型组成, 控制模型的集合就构成了控制模型向量:

$$B = [b_i] \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad k \leq m$$

m 为控制模型个数.

本系统中包括的控制模型主要有:

b_1 : $Kp e$ 比例模型; b_2 : $Kide/dt$ 微分模型;
 b_3 : $Ki \int dt$ 积分模型; b_4 : U_C 恒值模型; b_5 :
 $k \sum_{i=1}^n a m_i$ 峰值误差记忆和模型; b_6 : $f(e) \cdot e$ 变系数比例模型; b_7 : $\pm Um$, 峰值模型; b_8 : $Ui \pm a$ 输出预补偿模型. 以上均为解析模型.

b_9 : 风门开度 = $N_c \in [N_1(\text{小}), N_2(\text{较小}), N_3(\text{额定}), N_4(\text{较大}), N_5(\text{大})]$, Fuzzy 模型;

b_{10} : 给煤机转速 = $M_c \in [M_1(\text{低}), M_2(\text{较低}), M_3(\text{额定}), M_4(\text{较高}), M_5(\text{高})]$, Fuzzy 模型;

b_{11} : 主蒸汽压力 = $p_c \in [p_1(\text{低}), p_2(\text{较低}), p_3(\text{额定}), p_4(\text{较高}), p_5(\text{高})]$, Fuzzy 模型;

b_{12} : 床温 = $T_c \in [T_1(\text{低}), T_2(\text{较低}), T_3(\text{额})]$

定), T_4 (较高), T_5 (高)], Fuzzy 模型;

b_{13} : 烟气含氧量 = $O_i \in [O_1$ (低), O_2 (较低), O_3 (额定), O_4 (较高), O_5 (高)], Fuzzy 模型;

b_{14} : 主蒸气压力变化率 = $\Delta p_i \in [\Delta p_1$ (快降), Δp_2 (慢降), Δp_3 (平稳), Δp_4 (慢升), Δp_5 (快升)], Fuzzy 模型;

b_{15} : 床温变化率 = $\Delta T_i \in [\Delta T_1$ (快降), ΔT_2 (慢降), ΔT_3 (平稳), ΔT_4 (慢升), ΔT_5 (快升)], Fuzzy 模型;

b_{16} : 蒸气负荷 = $D_i \in [D_1$ (低), D_2 (较低), D_3 (额定), D_4 (较高), D_5 (高)], Fuzzy 模型;

b_{17} : IF A THEN B : $f(B, A)$, 规则模型;

2.2 规则模型库的表示方法

循环流化床锅炉燃烧专家控制系统规则模型库定义为如下的规则表示方式:

IF A THEN B : $f(B, A)$

式中, $A = \{A_i\}$ 表示规则的前提部分, A_i 表示第 i 个前提条件; $B = \{B_i\}$ 表示规则的结论部分, B_i 表示第 i 个推论或动作, 它又可以作为其它规则的前提条件; $f(B, A)$ 是 A, B 的一个函数, 它表示前提部分 A 为真, 对结论部分 B 的影响程度 (称作规则强度), 它刻画了知识的不确定性, 对 $f(B, A)$ 要明确规定 3 个具有代表性的度量, 即 A 为真, B 为真; A 为真, B 为假; A 对 B 没有影响. f 的解析式定义一般不易确定, 通常由领域专家经验 (或部分统计) 参照 f 的解析式的含义主观给出每个 $f(B, A)$ 的值.

由于知识库存在一个不断动态更新的过程, 因此对于知识库中众多的规则, 采用结论归类法对规则模型库中的规则进行分类, 以 B 为规则分类的统一标准, 形成各规则子类, 便于控制策略库对规则模型的调用. 规则模型库中的各规则模型均应用于控制策略库的控制模型向量中, 用以生成各种灵活的控制策略.

2.3 控制策略的生成方法

控制策略向量一般可表示为:

$$V = GB$$

式中, G 为控制提取算子, 以矩阵的形式表示为

$$G = [g_{ij}] \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m;$$

控制策略向量 V 以矩阵的形式表示为:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1m} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{n1} & g_{n2} & \dots & g_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} g_{11}b_1 + g_{12}b_2 + \dots + g_{1m}b_m \\ g_{21}b_1 + g_{22}b_2 + \dots + g_{2m}b_m \\ \dots \\ g_{n1}b_1 + g_{n2}b_2 + \dots + g_{nm}b_m \end{bmatrix}$$

由此, 多模态控制策略可写成

$$v_i = [g_{i1}b_1 + g_{i2}b_2 + \dots + g_{im}b_m]$$

通过在系统对 G 和 B 加以协调, 就可以得出所需的控制策略.

3 循环流化床锅炉燃烧专家控制系统的算法与实现

3.1 循环流化床锅炉燃烧专家控制算法

在 75 t/h 循环流化床锅炉实际控制中, 为保证燃烧控制的精度, 避免风门调节机构的非线性影响, 设置了风量检测装置 (包括一次风量和二次风量), 并通过调试, 将风门开度与风量的对应关系加以确定. 由于本台 75 t/h 循环流化床锅炉应用的环境为热电厂, 负荷变动幅度很大, 因此整个专家控制方案分为负荷粗调和床温细调两个部分. 首先按照蒸气负荷大小设定给煤机转速 (给煤量) 和送风量以便快速跟随负荷的大幅度扰动, 称为粗调; 然后根据主蒸气压力、床温和烟气含氧量调节给煤机转速和风量大小, 炉膛负压调节则采用随调方式. 循环流化床锅炉燃烧专家控制原理如图 1 所示.

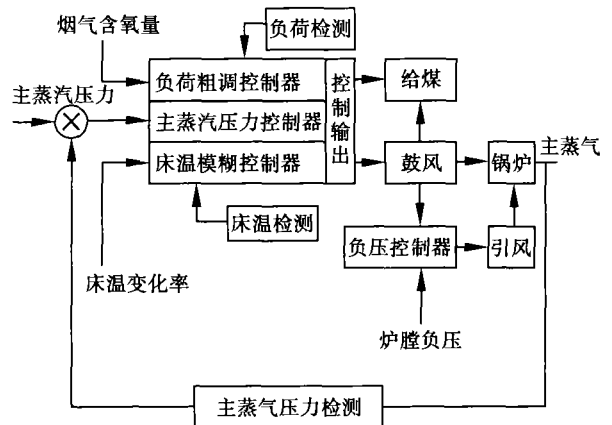


图 1 循环流化床锅炉燃烧专家控制原理示意图

燃烧控制策略生成过程: 首先把蒸气负荷 D 模糊化为 5 个状态值 D_{1L} 、 D_{1M} 、 D_M 、 D_{HM} 和 D_{HH} , 分别对应控制策略库中控制模型 b_{16} 的 5 个状态值, 然后根据运行经验由表 1 设定给煤机转速 R 和送风量 N 的大小; 主蒸气压力 p 、床温 T 以及烟气含氧量 O 的模糊化处理如表 2 所示; 锅炉主蒸气压力、床温及烟气含氧量按锅炉负荷不同可分别设定, 设定参数可在相应控制界面上实时修改; 主蒸气压力变

化率 Δp 和床温变化率 ΔT 可求取并模糊化为 5 个量, 具体如表 3 所示, 表中符号与控制策略库中相应控制模型符号一一对应.

表 1 D, R, N 的模糊子集

D	D_{LL}	D_{LM}	D_M	D_{HM}	D_{HH}
R	R_{LL}	R_{LM}	R_M	R_{HM}	R_{HH}
N	N_{LL}	N_{LM}	N_M	N_{HM}	N_{HH}

表 2 p, T, O 的模糊子集

p	p_{LL}	p_{LM}	p_M	p_{HM}	p_{HH}
T	T_{LL}	T_{LM}	T_M	T_{HM}	T_{HH}
O	O_{LL}	O_{LM}	O_M	O_{HM}	O_{HH}

表 3 $\Delta p, \Delta T$ 的模糊子集

Δp	Δp_{FD}	Δp_{SD}	Δp_{SF}	Δp_{SR}	Δp_{FR}
ΔT	ΔT_{FD}	ΔT_{SD}	ΔT_{SF}	ΔT_{SR}	ΔT_{FR}

本台 75 t/h 循环流化床锅炉燃烧控制基元向量为:

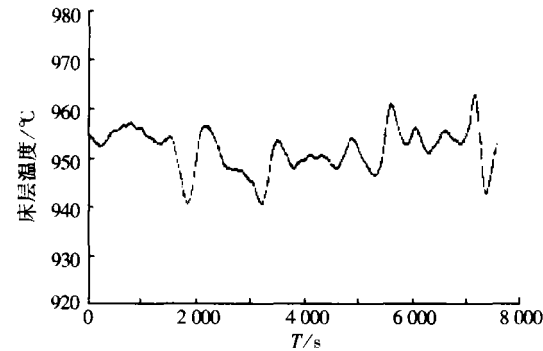
$$B = \left[D, R, N, p, T, O, \Delta p, \Delta T, f(e) \cdot e, Ki \int e dt \right]^T$$

控制提取算子的矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

最终实现循环流化床锅炉燃烧控制策略包括: 负荷粗调控制器:

$$v_1 = R + N + D;$$



带氧量前馈的主蒸气压力控制器:
$$v_2 = \Delta p + p + O;$$

床温模糊控制器:
$$v_3 = T + \Delta T;$$

炉膛负压变系数比例积分控制器:
$$v_4 = f(e) \cdot e + Ki \int e dt$$

3 2 循环流化床锅炉燃烧专家控制系统的实现与效果

循环流化床锅炉燃烧专家控制系统以模糊专家控制规则为核心实现锅炉的在线监测和实时控制, 方案在 JX-300X DCS 实施, 控制算法用 SCX 语言编程实现. 控制参数及规则表参数通过位号形式与人机界面交换数据以实现参数实时修改. 在界面包括了锅炉所有监测参数的实时显示, 所有的控制参数调整均在主界面上完成在线调整, 操作人员依靠主界面即可完成锅炉的整个监测与控制过程. 经对控制参数及规则表参数的调整, 图 2 为目前控制系统在 DCS 中实现后的投运效果图, 明显可以看出运行中床温与主蒸汽压力比手动控制时稳定得多, 床温变化范围仅在 25℃ 左右, 比手动操作的变化范围 80℃ 小得多. 由此可知模糊专家控制系统具有较好的动态特性, 使锅炉燃烧系统的运行更加稳定可靠.

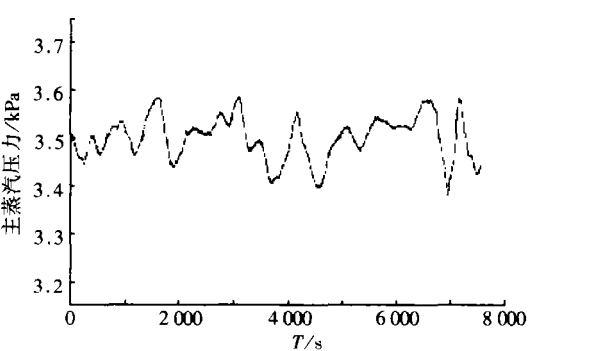


图 2 控制系统运行效果图

4 结论

循环流化床锅炉燃烧专家控制系统应用于 DCS 控制系统, 能够对锅炉的当前运行情况进行实时显示和基于专家建议的控制分析. 该系统能够较好地 完成循环流化床锅炉燃烧控制的要求, 改造后系统运行正常, 不须人工干预. 不但大大减少了工人的劳动强度, 而且获得了较好的运行经济性, 使锅炉发挥了高效率. 作为一个全面的解决方案, 应用 DCS 控制系统是可行有效的, 具有广阔的前景.

[参考文献]

[1] 蔡自兴. 智能控制——基础与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 115- 127.
[2] 蔡自兴. 人工智能及其应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1996. 13- 15
[3] 牛培峰. 国产 75t/h 循环流化床锅炉智能控制系统 [J]. 华东电力, 2000 (3): 15- 17.
[4] 沈凯. 循环流化床锅炉燃烧专家控制系统研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9 (2): 144- 146

[责任编辑: 刘健]