

## 一种锅炉燃烧控制的混合智能控制器

梁建武, 陈语林, 周 诚

(长沙铁道学院 现代教育技术中心, 湖南 长沙 410075)

**摘 要:** 针对锅炉燃烧控制系统具有强耦合、多干扰、典型非线性的特点, 提出一种理论加经验的混合智能控制方法, 将传统 PID 控制、前馈控制、专家控制相结合, 把三种方法的简便性、可靠性、抗扰动快速性、灵活性融为一体, 发挥各自的长处, 为工业控制开辟一种新途径。该系统成功应用在长沙曙光电子管厂 20 t/h 锅炉控制系统。

**关 键 词:** 燃烧; PID 控制; 前馈控制; 专家控制; 智能控制

中图分类号: TK223.7 文献标识码: A

## 1 引言

锅炉燃烧控制系统是一个耦合严重、具有严重非线性、时变特性、抗动变化激烈且幅值大的多变量系统, 送风量、引风量、热负荷、煤量、蒸汽量参数的变化都将对燃烧系统产生直接扰动, 当波动较大时, 将会造成整个燃烧系统拉锯, 出现振荡现象, 严重影响锅炉的安全运行。

燃煤锅炉实现自动燃烧, 历来是一个比较棘手的问题。实现自动燃烧的关键是控制炉室压力稳定。笔者以炉压控制为线索提出一种打破传统的锅炉燃烧控制系统方案。最传统的方案是在送风机、引风机前增设两个调节翻板来改变送风和引风量, 来达到控制目的。后来为了节能, 采用变频器直接调节送风机和引风机转速。以上改变都是通过经典的 PID 和前馈补偿等算法, 计算出输出控制量来实现。采用翻板操作主要是由于翻板调节是一种严重的非线性, 控制效果差, 且不能够达到节能的目的。而采用变频调节风机, 虽然在线性区和节能方面有所改善, 但频繁地调节电机的速度对大容量电机具有损害性, 并且控制效果不够理想。现综合以上两种方法, 在蝶阀实际开度处于线性调节灵敏区时, 采用调节翻板, 否则直接调节风机转速, 同时在算法上引用专家控制方案。

对于具有强耦合、强干扰、严重非线性的控制对象, 难以用常规方法控制。PID 控制器结构简单、工

作稳定、鲁棒性较强<sup>[1]</sup>, 已广泛应用于工业生产过程控制, 但对于需快速抑止扰动、时变非线性对象不能获得较理想的控制效果; 前馈控制能快速补偿扰动作用对被控变量的影响<sup>[2]</sup>, 但要求获得对象数学模型、扰动可测; 专家控制是将人的感性经验和定理算法结合的一种传统的智能控制方法<sup>[3]</sup>, 能够根据工业对象本身的时变性和不确定性以及现场干扰的随机性, 控制器采用不同形式的开环与闭环控制策略, 其主要优点是控制方法和知识表达的灵活性, 但灵活性同时带来了设计上的随意性。因此, 作者提出了一种将经典 PID 控制、前馈控制、专家控制相结合的混合智能控制方法, 把三种方法的简便性、可靠性、抗扰动快速性、灵活性融为一体, 发挥各自的长处。工业运行结果表明了该方法的有效性。

## 2 控制对象特性分析

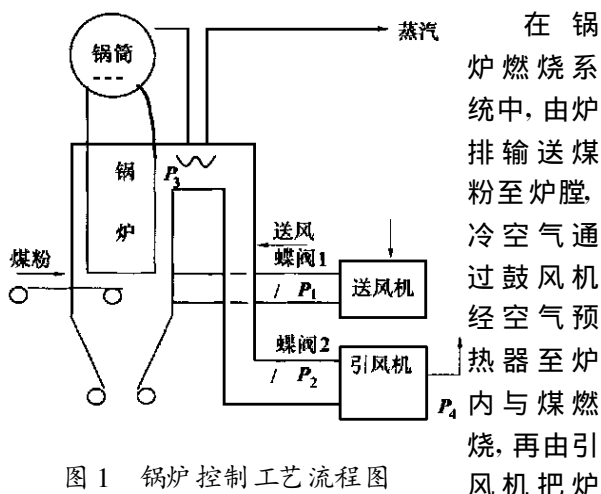


图1 锅炉控制工艺流程图

在锅炉燃烧系统中, 由炉排输送煤粉至炉膛, 冷空气通过鼓风机经空气预热器至炉膛内与煤燃烧, 再由引风机把炉内燃烧的废气吸出, 通过除尘排至大气, 其工艺流程如图1所示。送风量的多少主要决定进煤粉的量, 而最终的决定是负荷, 送风量的变化将直接影响炉内的压力, 这时要调节引风量, 使炉内压力趋于平衡, 送风量的调节手段主要由送风机和蝶阀1来完成, 而引风量的调节则由引风机和蝶阀2来实现。

因对象为正反馈的多输入输出系统, 各参数以特定的传递函数相联系, 它们互为条件互相促进, 一旦负荷发生变化, 就会造成系统的不稳定。并且与阀门开度、管道长度、管道直径等外部因素密切相关, 是时变、非线性的, 具有明显的不稳定性, 无法求得对象的数学模型, 若采用传统的控制方法, 很难得到理想的控制特性。

### 3 混合智能控制器的设计

根据锅炉系统特性, 采用将经典 PID 控制、前馈控制、专家控制相结合的方法, 设计混合智能控制器, 实现自动燃烧控制, 控制结构如图 2 所示。

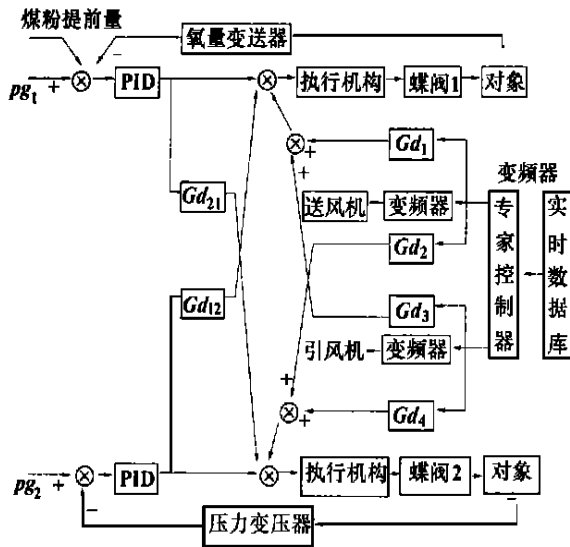


图 2 混合智能控制器结构图

(1) 采用 PID 控制器分别控制炉排和两个蝶阀翻板, 构成三个 PID 控制回路, 控制指标分别是蒸汽压力、烟道含氧量、炉内压力。

(2) 构成专家控制器, 通过变频器来改变送风机、引风机转速, 以调节送风和引风前吸力。

(3) 构成前馈控制器, 补偿由负荷、两个蝶阀翻板动作、风机转速改变给系统带来的扰动。

#### 3.1 PID 控制

蝶阀的动作直接影响炉内压力  $P_3$ , 若蝶阀实际开度  $V_1$ 、 $V_2$  处在线性调节灵敏区  $[V_{qmin}, V_{qmax}]$ , 通过调节  $V_1$  使炉内充分燃烧, 调节  $V_2$  使炉内压力稳定在设定范围, 采用 PID 控制算法计算蝶阀控制值 (负荷 PID 调节回路比较独立简单, 未予说明)。

#### 3.2 专家控制

风机前压力  $P_1$ 、 $P_2$  的变化都将影响炉压  $P_3$  的变化: 送风机转速上升,  $P_1$  增大,  $P_3$  上升; 反之  $P_3$  下降。而引风机转速上升,  $P_2$  减小,  $P_3$  减小; 反之  $P_3$  上升。而转速小量的变化, 将会引起炉内压力的波动, 必须经过多个调节周期后, 才能稳定下来。因此采取以保炉内压力为主同时兼顾尽量降低引风机转速的非定值调节方案, 风机转速的调节量由专家控制器计算给出。专家控制器主要由特征识别、信息库、推理和智能决策四部分组成。

##### 3.2.1 特征识别

特征识别单元实现对信息的提取和加工, 从实时数据库抽取所需特征信息, 如  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、气压、气量、炉温、煤量等, 再利用信息库中储存的经验数据识别系统的特征状态 (如负荷变大或变小、炉况异常、外围调节设备异常等)。

##### 3.2.2 信息库

根据工艺过程特点、工艺工程师和熟练操作工的知识和经验, 对引风机转速的调节采取这样的规则: 炉压超过设定最大值  $P_{max}$ , 阀位超过灵敏度最大值  $V_{qmax}$ , 则增大风机转速; 压力小于设定最小值  $P_{min}$ , 阀位低于灵敏区最小值  $V_{qmin}$ , 则降低风机转速; 机前引风压力  $P_2$  高于工艺允许最大值  $P_{2max}$ , 则降低引风机转速, 风机控制转速  $SP$  低于喘振转速  $SP_{min}$ , 则维持原来转速。

信息库存放工艺过程的领域知识<sup>[5]</sup>, 以产生式规则“IF conditions THEN results”来建立, 知识库中的主要规则为:

$$X_1: \text{IF}(P_3 > P_{max}) \text{ AND}(V_2 > V_{qmax}) \text{ THEN } u_3(k) = V_3 + \text{Limit}$$

$$X_2: \text{IF}(P_3 < P_{min}) \text{ AND}(V_2 < V_{qmin}) \text{ THEN } u_3(k) = V_3 - \text{Limit}$$

$$X_3: \text{IF}(P_2 > P_{2max}) \text{ THEN } u_3(k) = V_3 - \text{Limit}$$

$$X_4: \text{IF} SP < SP_{min} \text{ THEN } u_3(k) = V_3$$

上述规则中  $u_3(k)$  为变频器控制给定值,  $V_3$  为变频器输出反馈值, Limit 为可能的最小转速调节量, 取决于执行机构的调节精度。对于送风机调节和引风机调节方案一样, 只是控制指标不一样。

##### 3.2.3 推理结构

推理结构根据特征信息处理单元提纲的特征状态或它们的逻辑组合, 运用正向链接推理策略, 从知识库中提取相应的控制规则, 计算求得变频器控制的给定输入, 从而达到控制转速的目的。

### 3.2.4 智能决策单元

在炉压稳定前提下,应尽量降低引风机转速,以降低电能消耗。信息库中的  $X_2$  为降低引风机转速规则,但只有规则  $X_3$  为非炉压不稳定前提下降低转速,可见若使转速降低只能在线修改机前引风压力设定最大值  $P_{2max}$ 。机前引风压力  $P_2$  与机后压力  $P_4$  有直接相关性,机后压力越高,抽出同样流量烟气所需的机前引风压力就越大,因此将机后压力  $P_4$  分段,建立与机前引风压力设定最大值  $P_{2max}$  下式所示的关系:

$$P_{2max} = Y_i, P_4 \in (X_{i-1}, X_i)$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, 7$ ,  $X_i, Y_i$  为储存于知识库中的专家经验值。

### 3.3 前馈控制

当锅炉负荷加大时,则要求的送风量增大。增大1号蝶阀开度,减少阻力,使  $P_3$  升高,即1号蝶阀的动作会引起炉压  $P_3$  的波动,同样2号蝶阀的动作会引起送风量的波动,转速的调节会引起炉压很大的波动,因此在进行蝶阀和转速调节时引入前馈控制以补偿一个通道的控制作用对另一通道被控变量的扰动作用。

$$u_1(k) = u_1(k-1) + \Delta u_1(k) - Gd_{12} \cdot \Delta u_2(k) - y_{13}(k)$$

$$u_2(k) = u_2(k-1) + \Delta u_2(k) + Gd_{21} \cdot \Delta u_1(k) + y_{23}(k)$$

$$y_{13}(k) = 1 + Gd_{13} \cdot \Delta u_3(k-1) + GdN_{13} \cdot \Delta u_3(k-2)$$

$$y_{23}(k) = 1 + Gd_{23} \cdot \Delta u_3(k-1) + GdN_{23} \cdot \Delta u_3(k-2)$$

上式中,  $Gd_{12} = 1/3$ , 为2号蝶阀动作对送气量补偿系数,  $Gd_{21} = 1/2$ , 为1号蝶阀动作对炉压的补偿系数;  $y_{13}(k), y_{23}(k)$  为转速调节的补偿控制量,  $Gd_{13} = 1, GdN_{13} = 2, Gd_{23} = 2, GdN_{23} = 3$ , 均采用相关系数法求得。由于对象模型参数的不确定性,对扰动只是实现了部分补偿,本系统把前馈控制与反馈控制结合起来,前馈克服主要扰动的影响,反馈克服其余扰动以及前馈补偿不完全部分。这样,系统即使在大而频繁的扰动下,依旧可以获得优良的品质。

## 4 工业实现

### 4.1 硬件配置

根据工艺要求主机采用台湾研华工控机 IPC/610/586/166, 外围设备包括彩色显示器、打印机、键盘、UPS 等。

### 4.2 软件配置

由于该监控系统实时性要求快,控制反应速度一般在  $\mu s$  级,且是多任务操作,采用的编程语言一般既要考虑程序运行速度又要考虑其界面制作的方便性,在当今开发工业应用程序中,一般都是基于两类操作系统(Dos, Windows),然而单任务的 Dos 应用程序已逐渐为 Windows 应用程序所取代。这主要是利用了 Windows 新一代多任务操作系统在处理实时任务时的优良性能,以及良好的图形界面。可视化的 Visual C++ 在多任务编程、编译代码的运行速度和界面编程的简便化方面有其独有的特色,在工业控制性要求比较高的控制系统中是最为合适的。

### 4.3 实时曲线

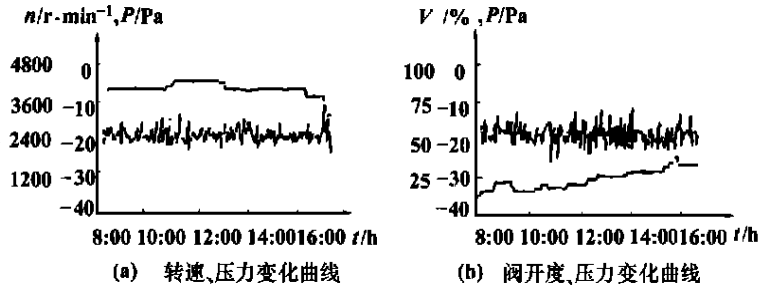


图 4 八小时历史趋势图

该系统投入使用两年来,运行稳定,未出现任何故障,实现锅炉自动燃烧控制,炉压基本在  $\pm 5$  Pa 范围内(图4),含氧量  $\pm 2\%$ ,蒸汽压力  $\pm 15$  Pa,节煤  $8\%$ 。

### 参考文献:

[1] 李卓. 基于 F 推理的自整定 PID 控制器[J]. 控制理论与应用. 1997, 14(2): 238-242.

[2] 俞金寿, 何衍庆. 集散控制系统原理及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1995: 106-110.

[3] 费敏锐. 智能控制方法的交叉综合及其应用[J]. 控制理论与应用. 1996, 13(3): 273-280.

[4] 蔡自兴, 徐光佑. 人工智能及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社. 1996: 344-347.

[5] 林德权. 串级调节在焦炉集气管压力系统中的应用[J]. 燃料与化工, 1990, 21(1): 38-40.

[6] 梁建武. IPC610 工控机在涟钢高炉喷煤控制系统中应用[J]. 企业技术与开发, 1997, (6): 24-26.

(复 编辑)

for enlarging CFL number is to select an implicit scheme. Under the condition of meeting both a required CFL number and precision a combination of Taylor expansion method and TVD scheme can produce a kind of implicit method featuring an accelerating convergence. **Key words:** TVD scheme, implicit method, accelerating convergence, viscous flow field

船用主汽轮齿轮机组调节控制保安系统故障分析 = **Fault Analysis of a Regulation, Control and Security System for a Naval Main Steam Turbine-gear Unit** [刊, 汉] / CHEN Lin-gen (Power Engineering Institute under the Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033), LIU Wei-guo (Naval Representative Office at Dalian Shipyard, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 543 ~ 545

Discussed are the failure forms and features of a regulation, control and security system for a new type of naval main steam turbine-gear unit. In addition, with an analysis of the underlying causes of faults and failures some countermeasures for their prevention are also proposed. **Key words:** main steam turbine-gear unit, regulation system, security system, fault analysis

一种锅炉燃烧控制的混合智能控制器 = **A Hybrid Intelligent Controller for a Boiler Combustion Control System** [刊, 汉] / LIANG Jian-wu, CHEN Yu-lin, ZHOU Cheng (Changsha Railway Engineering University, Changsha, Hunan Province, China, Post Code: 410075) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 546 ~ 548

The combustion control system of a boiler is known to have a multitude of specific features, such as a strongly coupled state, being subject to a variety of outside disturbances, typical non-linearity, etc. In light of the above a hybrid intelligent control system based on "theory plus experience" is proposed, which combines PID (proportional-integral-differential) control, feed-forward control and expert control. As a result, the simplicity, reliability, anti-disturbance, rapid reaction and flexibility of the above three control methods are organically grouped into an integrated whole, giving full play to their respective merits. Initiating a new approach for industrial control technology the system under discussion has been successfully employed for the combustion control system of a 20 t/h boiler installed at Changsha Shuguang Electronic Tube Factory. **Key words:** PID control, feed-forward control, expert control, intelligent control

300 MW 火电机组仿真机给水调节方案的改进 = **An Improvement on the Feedwater Regulation Scheme for a 300 MW Thermal Power Plant Simulation Unit** [刊, 汉] / WANG Xiang-wei (Anhui Electric Power Simulation Center, Hefei, Anhui Province, China, Post Code: 230051) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 549 ~ 551

In the course of the adjustment test of a simulation unit the design defects of the original control scheme of a feedwater automatic control system were analyzed and on this basis an improved scheme was proposed. After a modification of the related design modules and procedures of the simulation unit the regulation quality of the feedwater regulation system has been greatly enhanced. This brought about the realization of a formerly unachievable protection function, which has been verified and confirmed in production practice. It is noted that the simulation unit can be employed not only to conduct on-the-post training but also possesses a highly effective adjustment-test function. **Key words:** simulation, feedwater automatic control, adjustment test, multi-circuit balanced output module

一台余热锅炉受热面积灰和烟气除尘的改进分析 = **An Analysis of the Measures for Alleviation of Ash Buildup on the Heating Surfaces of a Heat Recovery Boiler and the Enhancement of Dust and Smoke Removal Efficiency** [刊, 汉] / HAN Jia-de, LU Yi-ping (Mechanical Engineering Institute under the Harbin University of Science and Technology, Harbin, China, Post Code: 150080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(5). — 552 ~ 553