

基于自抗扰控制的循环流化床锅炉床温系统的研究

林永君¹, 管志敏¹, 彭 钢², 王兵树¹

(1. 华北电力大学 控制科学与工程学院, 河北保定 071003; 2. 河北省电力研究院, 河北石家庄 050021)

摘 要: 床温是火电厂循环流化床锅炉燃烧控制系统中的一个重要参数。在分析循环流化床锅炉床层温度被控对象动态特性的基础上, 提出一种二阶自抗扰控制床温系统的设计方法, 并将仿真结果与 PID 控制方法的仿真结果进行了比较。研究表明: ADRC 在超调量、调节时间上均优于常规 PID 方法; 在各种工况以及增加外扰情况下, 该自抗扰控制方案具有良好的鲁棒性和抗干扰能力, 解决了该系统时变、大延迟的控制难点。

关 键 词: 循环流化床锅炉; 床温系统; 自抗扰控制器 (ADRC); 非线性; 鲁棒性

中图分类号: TK223.7 TP273 **文献标识码:** A

引 言

循环流化床锅炉 (简称 CFB 锅炉) 具有燃烧效率高、燃烧适应性广和低污染等优点, 在化工、造纸和电力等行业得到了广泛应用。但 CFB 锅炉在理论和实践两方面仍有许多不完善之处, 尤其在燃烧控制系统方面。大多数 CFB 锅炉自动化水平不高, 有的至今仍采用手动操作, 原因在于 CFB 锅炉是一个非线性、参数时变、扰动不确定性和多变量耦合的复杂系统^[1], 很难建立精确的数学模型, 如果采用固定参数的常规控制器, 当工况发生较大变化时, 很难保证控制系统的控制品质。

自抗扰控制器 (active disturbance rejection control ADRC) 具有不依赖于受控对象的精确数学模型, 算法简单, 在未知强非线性和不确定强扰动作用的情况下能保证控制精度, 具有较好的动静态性能。本研究针对循环流化床锅炉床温系统的强干扰、非线性和时变等特点设计出基于自抗扰控制技术的循环流化床床温控制系统, 以解决循环流化床自动化水平不高的问题。

1 CFB 锅炉床温的动态特性

床温是关系到 CFB 锅炉能否安全、高效运行的

重要控制参数, 它与蒸汽压力是一对强耦合的变量, 二者都是通过调节燃料量、一次风量来达到控制目的的。考虑送风系统的频繁动作不利于整个系统的稳定, 文献 [2] 提出的“空气-床温”系统实现了蒸汽压力与床温的完全解耦。因此, 本研究主要考虑通过调节燃料量来控制床温。

在给煤量阶跃扰动下, 现场辨识得到的对床温传递函数为^[3]:

$$G_p(s) = \frac{1 - \alpha s}{(1 + T_p s)^2} k_p e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中: k_p —增益; T_p —时间常数; τ —延迟时间, s 它们都随锅炉运行工况不同而变化, 当锅炉负荷在 25% ~ 100% 范围内变化时, k_p 在 5 ~ 10 之间变化; T_p 的变化范围为 100 ~ 200 s; τ 在 30 ~ 60 s 之间变动; α 值在 12 左右, 基本保持不变。

CFB 锅炉负荷变化时, 由于床内热容量大, CFB 锅炉温度的变化比煤粉炉具有更长的延迟时间。并且加入燃料的初温比炉内温度低, 在给煤加入后, 床温会有一定程度的下降。采用线性近似法可以得到 3 个典型负荷下温对燃料量的传递函数模型。25% 负荷下的对象参数: $k_p = 5$ $T_p = 100$ $\tau = 30$; 65% 负荷下的对象参数: $k_p = 7.5$ $T_p = 150$ $\tau = 45$; 100% 负荷下的对象参数: $k_p = 10$ $T_p = 200$ $\tau = 60$ 。

CFB 锅炉在动态特性上不同于煤粉炉和重油炉, 这主要表现在 CFB 锅炉燃烧室内流化层大容量的热平衡特性及其随运行工况的不同而变化的特性上。对 3 种负荷下控制对象的动态特性进行了分析, 如图 1 所示。可以发现, 当负荷较大时, 控制对象的延迟也就相应较大, 到达稳态需要的时间比较长, 控制难度也相应的增加。

大纯滞后的存在, 使得开环系统相位滞后增大, 幅值裕度和相位裕度减小, 结果使系统的稳定性降低、动态质量下降。

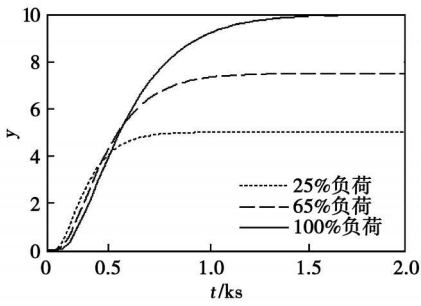


图 1 控制对象动态特性曲线

$$\begin{cases}
 \varepsilon = z - y \\
 \dot{z} = z - \beta_{01} f_k(\varepsilon, \alpha_1, \hat{\varphi}) \\
 \dot{z} = z - \beta_{02} f_k(\varepsilon, \alpha_2, \hat{\varphi}) + b^{-1} u \\
 \dot{z} = -\beta_{03} f_k(\varepsilon, \alpha_3, \hat{\varphi})
 \end{cases}
 \quad \text{三阶 ESO} \quad (4)$$

$$\begin{cases}
 \dot{\xi} = \nu_1 - \xi \\
 \dot{\xi} = \nu_2 - \xi \\
 \dot{y} = \beta_1 f_k(\xi, \alpha_1, \delta) + \beta_2 f_k(\xi, \alpha_2, \delta) \\
 u = y - \frac{z}{b}
 \end{cases}
 \quad \text{NLSEF} \quad (5)$$

2 自抗扰控制技术原理

自抗扰控制器是基于跟踪微分器 (TD) 安排过渡过程, 扩张状态观测器 (ESO) 估计系统状态、模型和外扰, 由非线性反馈控制律 (NLSEF) 来给定控制信号的一种非线性控制器^[4]。由于理论上对三阶及更高阶自抗扰控制器的研究不是很成熟, 一般采用一阶或者二阶的自抗扰控制器。

二阶自抗扰控制器的结构如图 2 所示。图中, 非线性跟踪微分器是安排过渡过程, 并提供此过渡过程的各阶导数的动态环节。在经典 PD 控制器中, 其快速性与超调的矛盾来源于未对给定输入做任何处理就直接加到控制器中。在自抗扰控制器中, 跟踪微分器根据参考输入和被控对象的限制来安排过渡过程, 因此避免了在经典调节理论中因设定值的突变而造成的控制量的剧烈变化以及输出量的超调的问题。

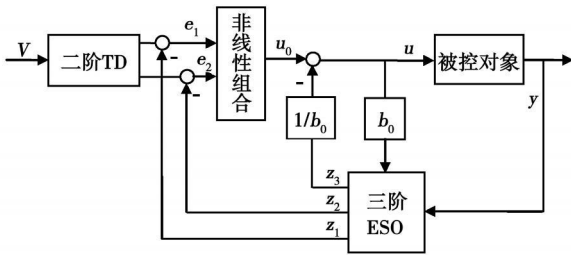


图 2 二阶自抗扰控制器结构

自抗扰技术可用于控制的不确定对象为:

$$\begin{cases}
 \dot{x}(\tau) = f(x, \dot{x}, n(\tau)) + b u(\tau) \\
 y = x(\tau)
 \end{cases}
 \quad (2)$$

式中: $n(\tau)$ —扰动。

自抗扰技术的二阶 ADRC 的方程为:

$$\text{二阶 TD} \begin{cases}
 \dot{\nu}_1 = \nu_2 \\
 \dot{\nu}_2 = -f(\nu_1, \nu_2, \nu(\tau), r, h)
 \end{cases}
 \quad (3)$$

式中: b —滤波因子; u, y —被控对象的输入信号和输出信号, 都是 ESO 的输入信号; z —是 ESO 的输出信号, 是对被控对象的模型作用 (内扰) 和外扰作用的估计信号, 即总干扰量的估计信号^[6]; 非线性函数 $f_k(\nu_1, \nu_2, \nu(\tau), r, h)$ 、 $f_k(\varepsilon, \alpha, \delta)$ 的表达式参见文献 [5]。

只要合理的选取参数 β_{01} 、 β_{02} 和 β_{03} , ESO 就能给出满意的估计信号, 这是独立于被控对象和外扰作用的观测器。

3 仿真研究

将自抗扰控制器应用于 CFB 锅炉的床温控制系统, 选系统输入信号 $x(\tau)$ 为单位阶跃信号, 对系统进行阶跃响应测试, 根据给出的 65% 负荷下的系统动态特性参数, 整定控制器参数。ESO 参数的整定结果为: $\hat{\varphi} = 0.5$ $\alpha_1 = 1.5$ $\alpha_2 = 0.5$ $\alpha_3 = 0.25$ $\beta_{01} = 1.7$ $\beta_{02} = 60$ $\beta_{03} = 0.3$ NLSEF 参数的整定结果为: $\alpha_1 = 0.9$ $\alpha_2 = 1$ $\delta = 0.5$ $\beta_1 = 0.25$ $\beta_2 = 35$ $b = 1$ 。

3.1 阶跃试验

床层温度对设定值的阶跃响应曲线如图 3 所示, 图中 y 是量纲为 1 的输出幅值。

与采用 PID 控制 CFB 锅炉床温系统相比较, 采用自抗扰控制所产生的超调量小于常规 PD 系统控制, 整个过渡过程显得更为平稳, 过程控制时间短。

3.2 鲁棒性试验

以 65% 负荷时的工况为例, 对 ADRC 控制系统的模型匹配与不匹配的情况下进行给定值单位阶跃响应测试, 如图 4 所示。ADRC 控制器的参数采用 65% 负荷时的参数, 被控对象分别采用 25%、65% 和 100% 负荷下的对象参数。从图中可以看出 ADRC 控制器具有很好的鲁棒性。

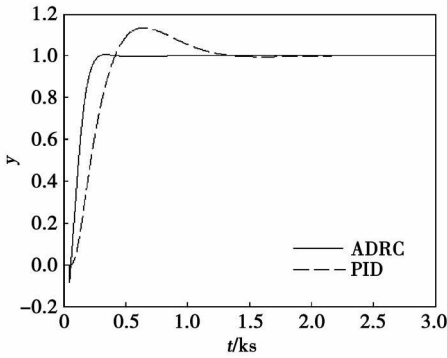


图3 65%负荷处的阶跃响应曲线

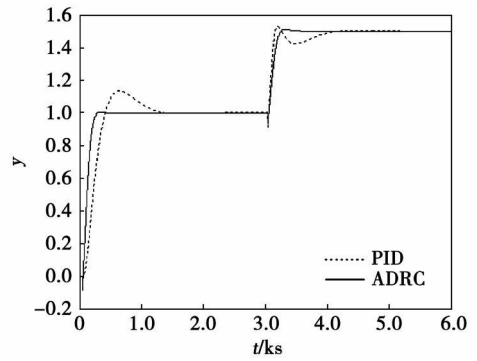


图6 t=3 ks时设定值改变后系统响应曲线

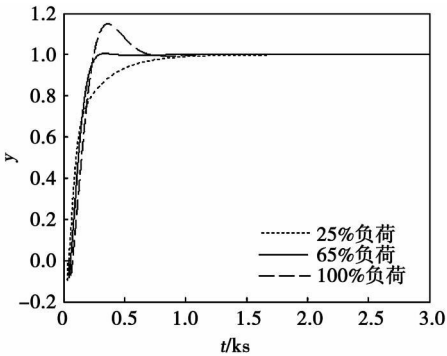


图4 ADRC的3个负荷阶跃响应曲线

同样的方法,对其它负荷点下的对象,也做了仿真研究,仿真结果表明 ADRC具有同样效果。

3.3 扰动试验

仍以 65%负荷时的工况为例,假设对象受 $n(t)$ 方波扰动,如图 5 所示。仿真时间为 5 ks 在 3 ks 时受到幅值为 0.1 的方波 $n(t)$ 扰动信号,扰动时间为 3 000 ~ 3 500 s。

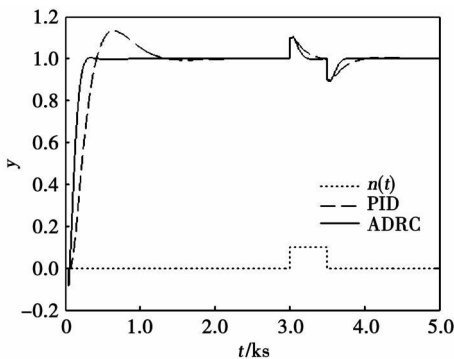


图5 n(t)扰动下床温的阶跃响应曲线

在 3 ks 时系统设定值发生改变,由 1 变为 1.5 系统响应如图 6 所示。

与 PD 控制结果相比,体现了 ADRC 系统具有很强的抗扰能力。

仿真试验表明,ADRC 控制器具有良好的鲁棒性和抗干扰能力。

4 结论

本研究提出的基于自抗扰技术的循环流化床床温控制系统具有很好的性能:

- (1) 具有较强的鲁棒性能,当床温动态特性改变时,自抗扰控制器不需要改变参数,就可以达到很好的控制效果;
- (2) 能有效解决床温系统的时滞问题;
- (3) 具有很强的抑制干扰的性能。

ADRC 循环流化床床温控制系统算法简单,而且 ADRC 系统的设计、调试对过程模型精度要求很低,特定情况下甚至只需要粗略定性了解对象特性即可,这给现场应用带来了很大方便。

参考文献:

[1] 于希宁,王慧,王东风,等.模糊控制在循环流化床锅炉床温控制中的应用[J].华北电力大学学报,2005,32(3):43-46.

[2] 焦健.循环流化床燃烧控制系统解耦设计[J].东北电力技术,2004,25(5):1-3.

[3] 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):62-71.

[4] 韩京清.自抗扰控制器及其应用[J].控制与决策,1998,13(1):19-23.

[5] 韩京清.自抗扰控制技术[J].前沿科学,2007(1):24-31.

[6] HUANG HUANPAQ HAN JINGQING Nonlinear PD controller and its applications in power plant / IEEE 2002 International Conference on Power System Technology Proceedings [C]. Kunming Yunnan Science & Technology Press 2002. 1513-1517.

循环流化床回料阀内气固两相流的实验研究 = Experimental Study of the Gas-solid Two-Phase Flow Inside the Material Return Valve of a Circulating Fluidized Bed [刊, 汉] / XIA Xiao-yu, LI Yuan, ZHU Tong (College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 201804) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5), —510 ~513

A cold state test and a numerical simulation were performed of the gas-solid two-phase flow inside the material return valve of a circulating fluidized bed. According to the features of the gas-solid two-phase flow under discussion, the Euler model was used to simulate the foregoing two-phase flow with the configuration of the pressure field and the gas and solid phase flow field inside the return valve being analyzed. It has been found that the pressure difference in the vertical tube is in direct proportion to its material piling height. The configuration of the gas phase flow field inside the material return valve is similar to that of the solid phase one. The porosity rates inside the material distribution chamber are scattered in a range from 0.45 to 0.55 while those in the transmission chamber are distributed mostly in a range from 0.65 to 0.9. The gas phase velocity distribution exercises an important influence over the porosity rate distribution inside the material return valve. The greater the speed in the area, the greater the porosity rate and vice versa. Key words: circulating fluidized bed, material return valve, gas-solid two-phase flow

基于自抗扰控制的循环流化床锅炉床温系统的研究 = Study of the Bed Temperature System for a Circulating Fluidized Bed Boiler Based on a Self Disturbance-resistant Control [刊, 汉] / LN Yong-jun, GUAN Zhi-min, WANG Bing-shu (College of Control Science and Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), PENG Gang (Hebei Provincial Electric Power Research Institute, Shijiazhuang, China, Post Code: 050021) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2009, 25(5), —514 ~516

The bed temperature is an important parameter for a CFB (circulating fluidized bed) boiler in a thermal power plant. On the basis of analyzing the dynamic characteristics of the objects controlled by the bed layer temperature of the boiler, proposed was a method for designing a two-order self disturbance-resistant bed temperature control system and compared were the simulation results with those obtained by use of the PID (proportional, integral and differential) control method. It has been found that the overshooting and regulation time duration of the self disturbance-resistant control (ADRC) are superior to those of the conventional PID method. Under various operating conditions and with an increase of disturbance from the outside, the ADRC version enjoys a good robustness and disturbance-resistant capability, thus solving the difficulties in controlling the time variation and long time delay of the system in question. Key words: circulating fluidized bed boiler, bed temperature system, ADRC (active disturbance-resistant control), non-linear, robustness

直流式低热值煤气燃烧器稳燃特性研究 = Study of the Combustion Stability Characteristics of a Direct flow Type Low-heating-value Coal Gas Burner [刊, 汉] / ZHAO Zhen-xing, CAO Zidong, CHANG Yong-qiang (College of Energy Source and Power Engineering, Xian Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(5), —517 ~520