

# 基于预测模型的模糊 -PID 控制试验研究

郭 奇, 杨秀利, 任 芳, 高 健

(燕山大学 环境与化学工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘 要:** 针对电加热锅炉夹套温度控制的大滞后、时变性等特点, 设计了基于预测模型的模糊 -PID(Fuzzy-PID)控制器。建立了预测模型, 利用模糊规则调整预测模型系数  $K$  值, 使加入预测模型的 Fuzzy-PID 控制器的动态性能和稳态精度都得到了很大的提高。在 Matlab 中实现了 Fuzzy-PID 控制的仿真, 进行了试验测试, 通过仿真和试验可看到加入了模糊控制规则的控制器的响应更迅速, 超调小、且抗扰动能力增强。试验结果表明, 该控制方案下的控制效果较好。

**关键词:** 预测模型; 模糊 -PID 控制; 仿真

中图分类号: TP273 TK229.92 文献标识码: A

## 引 言

温度控制是锅炉运行中重要问题之一, 而温度参数常常具有滞后性、时变等特点, 导致控制过程中遇到很多困难。常规的 PID 控制在这种对象过程滞后严重且复杂多变的情况下控制效果不佳, 采用先进控制技术方能达到预期效果<sup>[1]</sup>。预测控制作为先进过程控制的典型代表, 具有控制效果好、稳定性强, 能适应复杂生产过程控制的特点, 该方法亦能呈现出理论的深刻性和应用方法的创新性。本研究设计了基于预测模型的模糊 -PID 控制器。用优化预测模型系数  $K$  值等方法, 提高控制器的动态性能和稳态精度, 用仿真和真实试验测试两种方法都表明收到了良好的控制效果。

## 1 控制对象组成

研究对象由夹套式换热锅炉及循环水的动力系统组成, 如图 1 所示, 电加热锅炉由不锈钢锅炉内胆加温筒和封闭式外循环不锈钢冷却锅炉夹套组成, 内胆水温是由 SCR(三相调压装置)及冷却水循环来调控的。

夹套的水温是由内胆水温及夹套内的冷却水循

环决定的。水循环的动力系统由两路组成: 一路由丹麦格兰富循环水泵、调节阀、电磁流量计、自锁紧不锈钢水管及手动切换阀组成; 另一路单相丹麦格兰富循环水泵、变频调速器、涡轮流量计、自锁紧不锈钢水管及手动切换阀组成。采用 PT100 热电阻作为温度传感器对夹套温度进行检测。

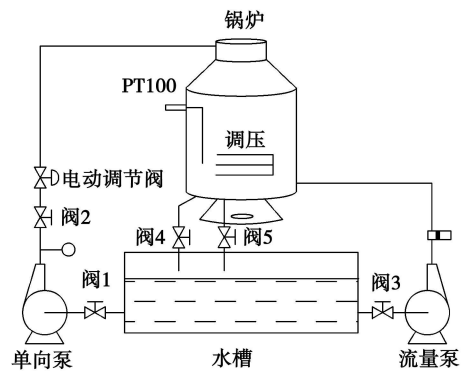


图 1 被控过程对象

## 2 控制器的设计

模糊 -PID 复合控制具有模糊控制动态性能好、抗干扰能力强、鲁棒性好的优点, 又具有 PID 控制较好的稳态精度<sup>[2]</sup>。但同时也应看到, 电加热锅炉是具有—阶惯性加纯滞后环节的控制对象, 由于其纯滞后特性的存在, 使得其很难控制。首先是大滞后的时间不能补偿, 其次控制器的参数调整工作量大, 且往往不易调准; 最后是系统的稳态精度还不很高, 在某些对稳态精度要求比较高的场合, Fuzzy-PID 复合控制还很难满足生产要求。

为了解决大滞后对象的控制问题, 人们也提出了一些纯滞后补偿的算法, 如 Smith 算法等<sup>[3]</sup>。但是该算法依赖精确的数学模型, 也只能预估有限的滞后时间, 补偿受到限制。对于大滞后、且模型建立

困难的对象难以满足要求。而基于预测控制的模糊-PD控制器能很好地改善模糊-PD控制器的动态响应特性和稳态特性。Fuzzy-PID控制的特点是能自动调整PD参数与偏差、偏差变化率之间的模糊关系,再根据模糊控制规则库对参数进行在线修改,使被控对象具有良好的静态特性和动态特性。但此方法只能根据系统当前的输出值实时控制,无法对系统未来的行为做出统计和预测,控制过程比较被动,对一些具有大滞后的对象来说,此问题更严重。为此,引入预测控制,两者组合后,成为带预测模型的Fuzzy-PID控制。该模型具备较强的适应内部参数变化的能力和更好的抗干扰能力。适合应用于具有时变、非线性、纯滞后、大惯性的控制系统中。

采用预测模型预测未来输出,在线滚动优化模型参数,将预测输出与实际输出比较的偏差及偏差变化率输入到Fuzzy-PID控制器,这样不仅充分发挥了Fuzzy-PID的优点,还补偿了过程的纯滞后,控制品质得到提高。该过程的仿真模型如图2所示。

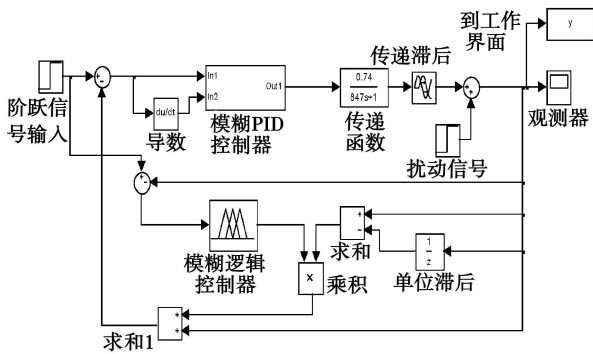


图2 基于预测模型的模糊PID控制仿真模型

### 2.1 预测模型

预测模型是为了预测某控制量下的未来的输出值,动态矩阵预测控制是通过阶跃响应曲线,计算符合过程模型的动态矩阵。预测输出由动态矩阵和控制量决定。而该算法的控制增量是通过使二次型目标函数最小为准则计算出来的,在电加热锅炉的温度控制系统中得到很好的应用<sup>[4]</sup>,但是该方法计算较复杂,为此选择了在线单值预估方法实现模型预测。

采集k时刻的系统输出值 $y(k)$ ,将该值保持一个采样周期,在下一个采样周期采集 $y(k+1)$ ,计算两次采样下的输出的差值 $\hat{y}(k+1)$ ,用来修正 $y(k+1)$ 得到预测输出 $\hat{y}(k+1)$ ,用该时刻输出的变化规律预估未来时刻的输出的变化,再将这个预测

输出 $\hat{y}(k+1)$ 反馈到输入端。该模型只预估未来一个采样周期的输出,采样周期设定合理就能达到较好的效果。在下一个采样周期来临之前, $\hat{y}(k+1)$ 也得到了更新,这样就可以实现在线校正,模型同步跟随过程输出变化,保证了模型能够随时跟踪实际情况。

在采样周期确定的情况下, $\hat{y}(k+1)$ 直接影响 $y(k+1)$ ,而 $y(k+1)$ 决定了预测模型对整个控制系统的作用大小。在模糊-PID控制器的作用下, $\hat{y}(k+1)$ 随着时间变化而变化,为了使预测模型能够在系统输出的变化规律的基础上适当调节预测能力的大小,在预测模型中引入了模型调整系数K使预测模型随参数变化得到量化处理。该参数的值由Fuzzy logic controller模块输出决定。该系数可以调整 $\hat{y}(k+1)$ 对 $y(k+1)$ 的影响,在采样周期确定的情况下,如果参数K为零,该仿真模型就等于模糊-PID控制;K的值越大,预测模型受两个连续采样周期下输出的差值影响越大;K的值过大,也会使稳态精度降低。同时,由于选用了单步预估的模型,所以采样周期对预估输出 $\hat{y}(k+1)$ 的影响也很大。采样时间的长短决定了预估差值 $\hat{y}(k+1)$ 。若采样周期短,对未来的预估受到采样周期限制,难以保证对未来偏差变化的精确把握;若采样周期越长,两采样周期间的输出差值越大,对预测输出的影响也就越大。随着采样周期增大,预测模型作用增强,输出的超调减小,控制品质提高。采样时间过长,预测输出过大,这样就造成了预测输出与设定值的偏差与实际输出相差较大,反而影响了输出响应的迅速性。

### 2.2 反馈校正

由于单一的预测模型调整系数K无法同时保证系统的动态性能和稳态精度,所以设计了基于模糊推理的反馈校正环节来调整预测模型系数,使该系数可以在线自我调整,在保证动态性能的同时保证稳态精度。

模糊规则库的输入是某一时刻系统输出值与设定值的差值E(不是预测误差),输出是预测模型系数K。模糊控制器的输出是为了在误差变化的基础上调整K值,当误差E较大时,K的值需要选的大一些,这样预测模型的预测输出比未来时刻输出大,控制作用就会增强,使曲线响应更快;当误差E减小时,K的值也应该减小。因为当误差较小时,如果K的值较大,就会使预测输出比未来输出大,控制作用增强,不利于系统的稳定。当误差为零时,预测模

型就可以不再起作用。依据此原则, 在采样周期确定为 5 的情况下, 调整 K 得到如图 3 所示的曲线。

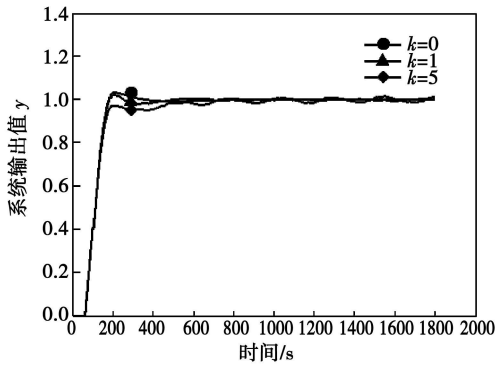


图 3 采样周期为 5 s 不同系数 K 的输出

由图 3 可以看到, 当 K 的值为 5 时, 系统输出没有超调, 但稳定性差, 当 K 为 0 时, 稳定性好, 但超调量较大。K 值的选取范围应该兼顾到超调量和稳定性两个方面, 合理的 K 值可以保证系统的动态性能更好。所以, 将 K 的取值范围限制在 [0 5]。

设误差 E 基本论域为 [-1, 1], 将误差分为 5 个等级, 分别表示为: -1, -0.6, 0, 0.6, 1。语言变量: [PB PS Q NS NB]。语言变量中子集中的元素表示: 正大, 正小, 零, 负大, 负小。

设预测模型系数 K 的论域为 [0 5]。将该系数的论域分为 3 个等级, 分别表示为: 0, 2.5, 5。语言变量: [SM B]。语言变量中子集中的元素表示: 小、中、大。

依据经验规则建立模糊规则, 如表 1 所示。

表 1 K 的模糊规则

E	K
NB	B
NS	M
O	S
PS	M
PB	B

经过模糊推理得到的是一个模糊隶属函数, 而在实际应用中要给出一个确定值, 这就必须从模糊隶属函数中找到一个最能代表输出 K 的精确值。常用的方法是最大隶属度法、重心法和加权平均法。本系统采用了重心法解模糊器。

### 2.3 仿真实现

将上述方案应用在电加热锅炉的温度控制中, 该锅炉由炉胆和夹套两部分组成。三相 SCR 移相

调压装置是热源, 它可以直接给炉胆内的水加热, 炉胆水温升高后夹套的水温也随之升高, 并且炉胆和夹套都有各自的进水口及出水口, 冷却水的循环可以为炉胆和夹套的水实现降温。该过程近似为一阶惯性加纯滞后环节, 建立该对象的数学模型为:

$$G(s) = (K/T_s + 1) e^{-\tau s}$$

式中: K—过程增益; T—时间常数, s;  $\tau$ —滞后时间, s

由试验获得参数  $K=0.74$ ,  $T=847$  s,  $\tau=309$  s

选择单位阶跃信号为输入量, 扰动信号大小为阶跃信号的 20%。在仿真模型中调整采样时间为 5 s, 实现基于预测模型的模糊 -PID 控制的仿真。与常规 PID 控制及模糊 -PID 控制曲线比较如图 4 和图 5 所示。

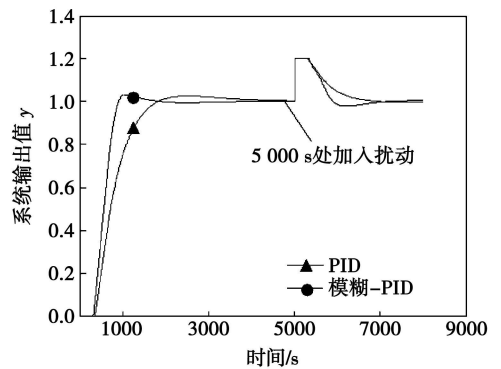


图 4 模糊 -PD 与 PID 仿真控制曲线

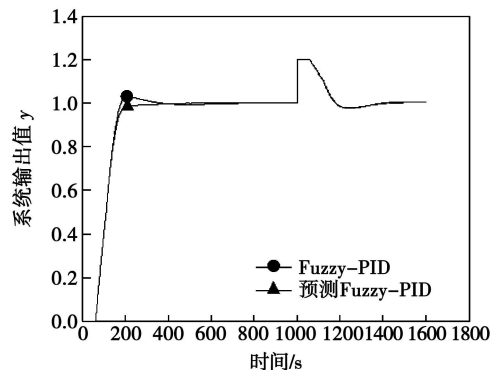


图 5 模糊 -PD 与基于预测模型的 Fuzzy-PID 仿真控制曲线

### 2.4 试验测试比较

将电加热锅炉的温度参数控制作为试验平台, 对预测函数控制器的实际控制效果进行了检验并与传统 PID 控制器的控制效果进行了比较, 从实际效果看预测函数控制器的功能。实验曲线中三角型点标记的绿色线表示温度设定值, 圆点标记的蓝色线

表示温度测量值, 菱形块标记的红色线表示调压模块输出值。图 6 为常规 PID 温度控制曲线, 图 7 为本文设计的基于预测模型的模糊 -PID 温度控制曲线。

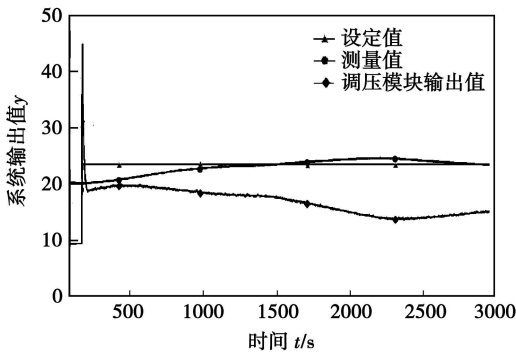


图 6 常规 PID 控制曲线

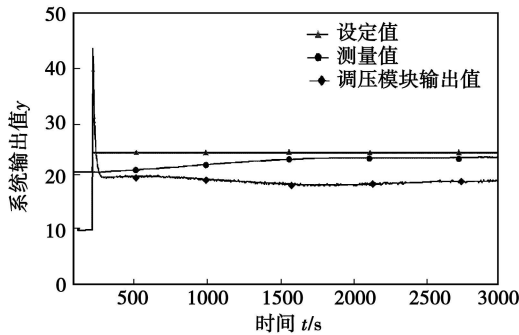


图 7 预测模型 PID 控制曲线

### 2.5 结果分析

从图 4 仿真结果的可以看出, 模糊 -PID 控制不仅提高了 PID 控制的抗扰动能力, 也提高了响应的迅速性, 这在响应曲线的变化过程中体现的很明显。图 5 是加入了预测模型的模糊 -PID 控制与模糊 -PID 控制相比的曲线图, 由图可以看到, 加入预测模型后的控制器不仅保证了响应的迅速性及抗扰动能力, 还很大程度的消除了由大惯性及大滞后影响带来的超调。在预测模型系数的自动调整作用下, 控制输出的稳态精度也得到保证, 加入预测环节的控制器在控制品质上得到了很大提高。

从试验结果上看, 与仿真结果有很好的一致性。

系统具有较好的动态特性, 从图 6 和图 7 控制曲线上可以看出, 常规 PID 控制时, 系统因有较大的滞后而产生幅值为 2~3 °C 的超调, 采用预测模型的模糊 PID 控制时, 系统超调量大幅降低, 数值接近为零, 温调速度也加快, 将常规 PID 控制的调节时间缩短了一半。

系统具有比较理想的稳态品质, 调节过程比较平稳, 温度控制精度大幅提高。

系统的抗干扰能力增强, 对生产现场各种干扰和噪声具有较好的抑制作用。

### 3 结论

预测模型实现了对未来输出的预测, 在预测模型中引入了模型调整系数  $K$  确定了  $K$  值的合理范围, 使预测模型随参数变化得到量化处理, 使控制器兼顾系统的动态性能的同时保证了稳态精度, 减少了大滞后及大惯性对控制结果的影响。模糊 -PID 控制器实现了 PD 参数自动调整功能, 使控制器的响应更迅速, 抗扰动能力增强。夹套温度控制的实验结果表明, 系统所采用的基于预测模型的模糊 -PID 控制器的综合性能得到明显提高。

本研究将先进控制策略从仿真阶段提升到实际应用阶段, 是在 DCS 平台上开发的先进控制算法的一次有效突破, 为在校后生后续开设综合性、创新性试验提供一个范例, 对解决工业过程中的大滞后、时变和非线性环节的控制问题有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] 黄得先, 叶心宇, 竺建敏, 等. 化工过程先进控制 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
- [2] 路桂明, 周美兰, 林治楠. 电锅炉智能控制系统的设计 [J]. 机械研究与应用, 2007 20(1): 72-73
- [3] 张建军. 基于模糊 Smith 控制的燃烧炉温控系统的工业应用 [J]. 山东纺织经济, 2007(4): 78-79
- [4] 张美玉, 齐家国. 动态矩阵控制算法在电加热炉温控中的实现 [J]. 浙江工业大学学报, 2002 30(4): 360-365
- [5] 王骥程, 祝和云. 化工过程控制工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

(编辑 陈 滨)

Energy & Power — 2011, 26(3). — 333 ~ 337

Against the backdrop of the application of high temperature air combustion technology in industrial boilers, a simulation study was performed of the high temperature air combustion characteristics of the single nozzle combustor of a concentric type axial swirling flow high temperature air burner. The Reynolds stress model (RSM) was used in the turbulent flow transmission equation and the PDF (Probability density function)-based combustion model featuring the  $\beta$  function was employed by the gas phase combustion model. The radiation heat exchange process was simulated by using a discrete coordinate method. The  $\text{NO}_x$  model is of the thermal type. With natural gas serving as the fuel, when the preheated air temperature is 1 273 K, the oxygen content of the air reaches 8%. Under the condition of the total excess air factor for combustion being 1.1, a numerical simulation calculation was conducted. The influence of such parameters as the swirling flow angle and the spiral extension length of the burner etc. on  $\text{NO}_x$  emissions, local temperature, oxygen concentration and CO concentration distribution etc. was investigated. The research results show that the swirling flow burner can further reduce the  $\text{NO}$  emissions and make the combustion more complete. When the spiral rib extension factor  $R=2$ , fuel/air speed ratio  $a=1.09$  and the swirling flow angle  $\theta=180^\circ$ , the  $\text{NO}$  emissions concentration attains the minimum, the outlet  $\text{NO}$  molar fraction hits  $12.9 \times 10^{-6}$  and the outlet CO molar fraction reaches  $29 \times 10^{-6}$ . When the swirling flow angle  $\theta=0$  (direct jet flow), the above mentioned fractions are  $31.7 \times 10^{-6}$  and  $372 \times 10^{-6}$  respectively. Key words: industrial boiler, high temperature air combustion, swirling flow burner

$\text{CO}_2$  稀释对乙烯/空气扩散火焰烟尘形成和温度场的影响 = Influence of  $\text{CO}_2$  Dilution on Ethylene/air Diffusion Flame caused Soot Formation and Its Temperature Field [刊, 汉] GU Zhong-zhu (College of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, China, 210042) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 338 ~ 342

The diffuse light two-dimensional line of sight attenuation (2D-LOSA) technology was used to detect the volumetric concentration of the soot in the ethylene/air laminar flow diffusion flame diluted by carbon dioxide and its temperature distribution regularity. It has been found that when the fuel has been diluted by an appropriate amount of carbon dioxide, the production of soot in the flame can be greatly restrained with a very small influence on the temperature field. A maximum soot concentration will exist around the mid-height of the flame and its corresponding position will move up with an increase of the carbon dioxide concentration. At the bottom and top of the flame, almost no soot is produced. To add carbon dioxide to the fuel to contain the production of soot mainly depends on the dilution effect and direct chemical reactions, during which the latter play a role bigger than the former. Key words: soot formation, carbon dioxide, laminar flow diffusion flame, optical diagnosis

基于预测模型的模糊-PID控制试验研究 = Experimental Study of a Fuzzy-PID (Proportional, Integral and

Differential Control Based on a Prediction Model [刊, 汉] GUO Qi YANG Xu-li REN Fang et al (College of Environment and Chemical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, China, Post Code: 066004) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 343 ~ 346

In the light of such specific features of the temperature control over the clapping sleeve in an electrically-heated boiler as a big lagging and time variation etc., designed was a fuzzy-PID (proportional integral and differential) controller based on a prediction model. After the above-mentioned prediction model has been established by employing the fuzzy principle, the coefficient  $K$  value in the prediction model was adjusted, resulting in a great enhancement of the dynamic performance and steady state precision of the fuzzy-PID controller added by the prediction model. In Matlab, a simulation of the fuzzy-PID control was realized and also experimentally tested. From the simulation and experiment, it can be seen that the controller provided with the fuzzy control principle responds more quickly and has a smaller overshoot and greater capacity to resist the disturbance than a conventional PID controller. The test results show that the control effectiveness by adopting the control scheme in question is relatively good.

Key words: prediction model; fuzzy-PID (proportional integral and differential) control; simulation

多煤种混煤燃烧特性和动力学研究 = Study of the Combustion and Dynamic Characteristics of a Multiple Coal rank-blended Coal [刊, 汉] LIU Yan-jun ZHOU Jiem-in (College of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha, China, Post Code: 410083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 347 ~ 350

By using a SDTQ-600 type temperature difference thermogravimetric analyzer, a thermogravimetric experiment was conducted of a blended coal composed of three single coal ranks in various proportions. The combustion and dynamic characteristics of the blended coal were studied. The test results show that the initial precipitation and ignition temperature of the volatile component of the coal will decrease with an increase of the proportion of the single coal rank with a highest volatile content and the maximum weight loss rate will increase with an increase of the carbon content of the coal. The Gorbachev integral formulae and a dynamic model for primary reactions were used to seek solutions to the activation energy and frequency factor of the coal, during which the solutions are in relatively good agreement with the dynamic curves. When the coal ranks consisting of the blended coal are identical, the activation energy and volatile content of the blended coal as well as its activation energy and ignition temperature assume a good linear relationship. When the blended coal is in short of any single coal rank, such linear relationships will be destroyed.

Key words: blended coal; activation energy; volatile content; thermogravimetric analysis

主蒸汽压力与热耗修正曲线的变工况算法 = Method for Calculating Main Steam Pressure and Heat Rate Correction Curves Under Off-design Operating Conditions [刊, 汉] ZHOU Lan-xin HUA Min (College of Power Engineering, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), WANG