

模糊自适应内模控制在电加热锅炉温度控制中的应用研究

郭 奇¹ 任 芳¹ 杨田锋² 刘振永²

(1. 燕山大学 环境与化学工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 秦皇岛通联重工有限公司, 河北 秦皇岛 066102)

摘 要: 针对电加热锅炉夹套温度控制具有的非线性、滞后性、易受扰动等特点, 在 JX-300X DCS 系统设计出模糊自适应内模控制控制方法。通过建立内部模型, 利用模糊规则在线调整内模控制器中滤波器时间常数 T_f 。采用 SCX 语言进行模糊自适应内模控制算法的编程设计, 在 DCS 的平台上进行控制试验。试验结果表明, 模糊自适应内模控制比常规 PID 控制的控制性能有很大提高, 响应迅速, 超调接近为零, 调节时间短, 稳定精度高, 抗干扰能力及鲁棒性强。

关 键 词: 集散控制系统; 模糊自适应内模控制; PID 控制
中图分类号: TK229.92; TP273 文献标识码: A

引 言

JX-300X 是浙江中控集团中控技术有限公司推出的全数字化的新一代集散控制系统 (Distributed Control System, DCS), 该系统充分应用了最新信号处理技术、高速网络通信技术、可靠的软件平台和软件设计技术以及现场总线技术, 采用了高性能的微处理器和成熟的控制算法, 使其兼具了高速可靠的数据输入、输出、运算、过程控制功能和 PLC 连锁逻辑控制功能, 能适应更广泛更复杂的应用要求, 成为一个全数字化、结构灵活、功能完善的新型开放式集散控制系统。

但该系统中的控制方法主要以常规 PID 控制为主, 目前的组态软件中还缺乏先进控制方法或者先进控制方法不完全, 随着企业对先进控制的迫切需求, 在 DCS 平台及现有的组态软件中开发新的先进控制算法就显得尤为重要。

本研究涉及到的锅炉类设备的温度控制受其自身结构因素和周围环境条件的影响, 具有典型的非线性、滞后性、易受扰动等特点。用常规的 PID 控制方法对其进行控制时达不到理想效果, 控制系统响应不及时、超调量大、过渡时间长、抗干扰能力差, 这

些问题的综合影响在生产过程及整套装置的运行中影响很大, 因此, 对其实施先进控制策略很有工程实际意义。

1 实验对象

本研究的被控对象浙江中控公司研发生产的含有电加热锅炉的过程控制装置 AE2000, 其结构如图 1 所示。

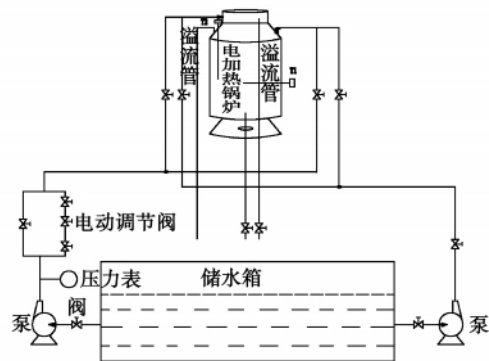


图 1 电加热锅炉结构流程

该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。内胆中有三相 4.5 kW 电加热管, 通过控制三相交流电源电流的大小实现电加热管功率的连续变化。内胆中的水与夹套中的水经过热交换来改变夹套中水的温度。通过泵 2 及阀 10 将夹套中的水装至适当高度后关闭。储水箱中的水经由泵 1 及阀 5 打入锅炉内胆, 内胆中的水为动态循环水, 这样加快了散热能力, 有利于热交换, 相比于静态温度控制, 在控制的精度上和快速性上有了很大的提高。

锅炉夹套温度首先通过调节三相加热管的加热

功率改变锅炉内胆中水的温度,经换热后才能体现出温度的改变,因此该换热器具有很大的滞后性。且温度的控制易受循环水流量等因素的干扰。

2 模糊自适应内模控制器设计

内模控制是一种基于过程数学模型进行控制器设计的新型控制策略。它的主要优点是通过简单的选择一个稳定的内模控制器就可以保证闭环系统的稳定性。内模控制和 Smith 预估控制一样适用于纯滞后过程^[1],且内模控制明确的考虑了模型的不确定性,消除了不可测干扰的影响。内模控制解决了 Smith 预估控制对被控对象数学模型精度要求较高的问题,且设计简单而被广泛应用。

在实际工作情况下,模型与不同工况下的实际过程总会存在误差,在设计内模控制器时分两步进行。首先设计一个稳定的理想控制器,不考虑系统的鲁棒性和约束;其次引入滤波器,再通过调整滤波器的结构和参数来获得期望的动态品质和鲁棒性。

模糊控制不需要计算被控对象的精确数学模型,能够对复杂的非线性过程有很好的控制效果。

内模控制虽然考虑了模型失配和干扰等因素的影响,但滤波器时间常数的选择影响着整个控制的效果。能否选择一个合适的时间常数是控制过程成功与否的关键;模糊控制虽然能对复杂的和难以建模的过程进行简单而有效的控制,但是简单的模糊控制器由于不具有积分环节,因而很难消除稳态误差,尤其在变量分级不够多的情况下,常常在平衡点附近产生小幅震荡。为了使锅炉夹套温度控制响应快、超调小、稳态精度高、鲁棒性强^[2],结合内模控制、模糊控制以及 PID 控制方法开发出模糊自适应内模控制。即通过模糊控制规则在线整定基于内模控制的 PID 控制中的滤波器参数 T_f ,使其在控制过程中达到优化。

(1) 选择语言变量:输入语言变量选择偏差 e 和偏差变化 ec 输出语言变量为滤波器时间常数 T_f 的增量 ΔT_f 。滤波器时间常数采用增量算法:

$$T_f = T_f^* + \Delta T_f$$

(2) 定义输入输出模糊集: $e, ec, \Delta T_f$ 的模糊集合的控制规则如表 1 所示。表中的 NB NS ZO PS PB 是语言变量,分别表示负大、负小、零、正小、正大。

e, ec 和 ΔT_f 的论域取为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。

(3) 定义输入输出隶属函数:取 e 和 ec 的隶属函数为高斯型, ΔT_f 的隶属函数为三角形,其隶属函数如图 2 和图 3 所示。

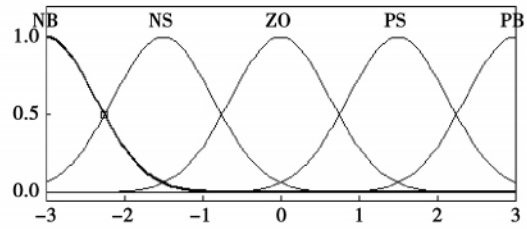


图 2 偏差变化 ec 的隶属函数

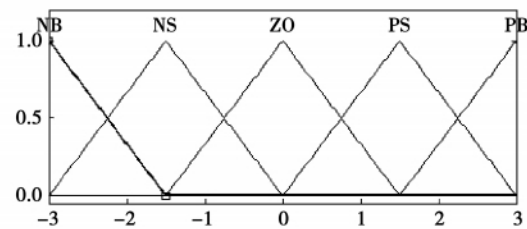


图 3 滤波器时间常数增量 ΔT_f 的隶属函数

(4) ΔT_f 模糊控制规则

ΔT_f 的整定原则为: T_f 越小,系统的闭环输出响应越快,输出对设定的跟踪滞后越小; T_f 越大系统的鲁棒性越好。

表 1 ΔT_f 模糊控制规则

e/ec	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZO
NS	NB	NS	NS	NS	ZO
ZO	NB	NS	ZO	ZO	PS
PS	NS	ZO	PS	PS	PB
PB	ZO	PS	PS	PB	PB

在模糊控制系统中量化因子 k_e, k_{ec} 及比例因子 k_{Tf} 、滤波器时间常数初始值 T_f^* 大小的选择对系统的控制性能有很大的影响。 k_e 选择越大,系统上升速率越快,但是超调会越大,调节时间增长; k_{ec} 越大,系统响应速度会变慢,稳定性增强; k_{Tf} 越大,系统响应速度加快,超调也会增大^[3]。

经过反复多次实验,取 $k_e = 0.5, k_{ec} = 30, k_{Tf} = 50, T_f^* = 450$ 。

3 模糊自适应内模控制在 DCS 中的实现

3.1 对象特性实验

通过锅炉夹套温度特性实验,得到其特性曲线,进而求得其特性,以一阶惯性加滞后环节来描述锅炉夹套特性。经过多次实验取平均为:

$$G_p(s) = 1.16 / (790s + 1) \exp(-300s)$$

3.2 控制站组态

控制站组态是指对系统硬件和控制方案的组态,主要包括 I/O 组态、自定义变量组态、常规控制方案或自定义控制方案组态等。

(1) I/O 组态、自定义变量组态:对锅炉内胆温度 TI-101,锅炉夹套温度 TI-102,调压模块输出 VO-001,以及控制程序中用到的部分中间变量如滤波器时间常数初始值进行组态。

(2) 自定义回路组态:实现的锅炉夹套温度模糊自适应内模控制需要调用系统的单回路 PID 控制模块,在自定义回路中为该回路定义 [S02_E028],得到一个回路编号 25。

(3) 自定义控制方案组态:浙江中控公司的 DCS 控制系统支持 8 种常用的典型控制方案,若要想实现比较复杂或先进的控制算法,系统提供的常规控制方案就不能满足要求了,这时需要根据实际需要自定义控制方案。自定义控制方案可通过 SCX 语言编程或图形化编程两种方式来实现。这里我们用 SCX 语言编程软件来实现锅炉夹套温度的模糊自适应内模控制。SCX 语言编程软件是 SUPCON WebField 系列控制系统控制站的专用编程语言之一,SCX 语言属高级语言,语法风格类似标准 C 语言,除了提供类似 C 语言的基本元素表达式等外,还在控制功能实现方面做了大量扩充。在工程师站完成 SCX 语言程序的调试编辑,并通过工程师站将编译后的可执行代码下载到控制站执行。

实验用到的部分 SCX 语言程序如下:

```
Int e, ec;
Int a, b, d, fb, kf, k;
Sfloat pc, pcb, pcl, pcb1;
Sfloat e1, e2;
Sfloat ec1, ec2;
Int c[49];
Main()
{
  If ( g_bsc [25]. SwSV == ON)
```

```
{
  g_bsc [25]. SV = g_bsc [25]. PV;
}
Else if ( g_bsc [25]. SwSV == OFF)
{
  pc = g_bsc [25]. SV - _TAG( "TI_102") . PV;
  pcb = pc - pcl;
  pcb1 = sfdiv( pcb 0.5f );
  pcl = pc;
  e1 = sfmul( pc 0.5f );
  ec1 = sfdiv( pcb1 0.033f );
  .....
  _TAG( "VO_001") = bsc( _TAG( "TI_102") . PV ,
  25);
}
```

3.3 操作站组态

操作站组态是对系统操作站操作画面的组态,主要包括它主要包括操作小组设置、标准画面(总貌画面、趋势画面、控制分组画面、数据一览画面)组态、流程图登录、报表制作等部分组成。

在工业控制系统中,报表是一种十分重要且常用的数据记录手段,它一般用来记录重要的系统数据和现场数据,以供工程技术人员进行系统状态检查或工艺分析。本文对锅炉夹套温度和内胆温度进行报表组态

流程图是控制系统中最重要、最重要的监控操作界面类型之一,用于显示被控设备对象的整体工艺流程和工作状况,并可操作相关数据量。

4 实验结果及分析

对锅炉夹套温度进行常规 PID 控制和模糊自适应内模控制实验。实验曲线中用不同的标记分别表示了温度设定值、温度测量值和调压模块输出值。图 4 是常规 PID 控制曲线;图 5 是模糊自适应内模控制曲线。模糊自适应内模控制的参数变量主要有 4 个,即滤波器时间常数初始值、输出比例因子、误差变化量化因子和误差量化因子;这 4 个参数取不同的控制效果,按不同的选值组合经多次试验后得到两组优化曲线。其中,图 5(a)是第一套优化组合参数曲线;图 5(b)是第二套优化组合参数曲线。

结果显示:系统具有较好的动态特性,从试验曲线可以看出,常规 PID 控制时,系统因有较大的滞后而产生较大的超调,接近 2℃,采用模糊自适应内模

控制时,系统超调量几乎降为零,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。

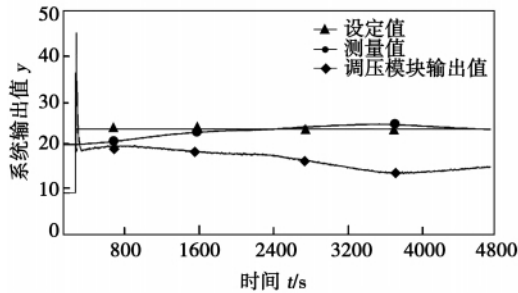
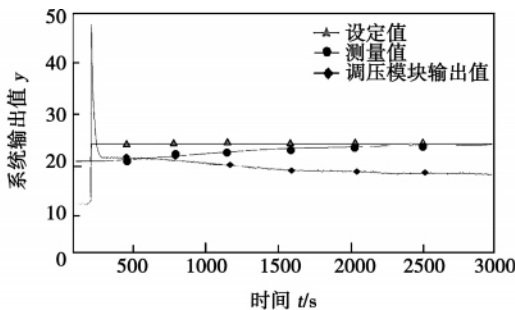
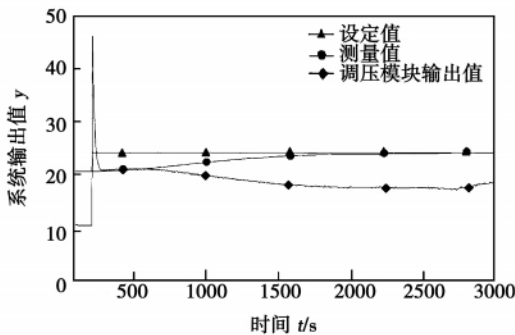


图 4 常规 PID 温度控制曲线



(a) 第一套优化组合参数曲线



(b) 第二套优化组合参数曲线

图 5 模糊自适应内模温度控制曲线

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。

5 结 论

从目前的调试和运行情况来看,新设计的模糊自适应控制器结合了内模控制、模糊控制的优点,通过模糊规则在线调整滤波器时间常数,使具有滞后、时变特点的被控对象比常规 PID 控制有优良的动态响应品质,有调整灵活、计算量小、实时性强等特点,又具有良好的稳定性。

在 DCS 组态中开发先进控制算法有较大的参考价值,扩展了 DCS 控制功能,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,为工程应用提供了先进的思路和可操作方法;也为在校后开设综合性、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] 潘立登. 过程控制技术原理与应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 王树青. 先进控制技术及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [3] 苏洁, 任佳, 潘海鹏, 等. 基于 DCS 平台的水箱液位控制系统的模糊控制算法 [J]. 浙江理工大学学报, 2009, 26(4): 544-546.
- [4] 王蕾蕾, 王孟效. Fuzzy IMC-PID 控制器的设计与仿真研究 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(32): 220-222.
- [5] 赵曜. 内模控制发展综述 [J]. 信息与控制, 2000, 9(6): 526-530.
- [6] SHAMSUZZOHA M, MOONYONG LEE. IMC-pid controller design for improved disturbance rejection of time - delayed process [J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2007, 46(7): 2077-2091.

(陈 滨 编辑)

敬告作者、读者

随着科学技术的快速发展,新的科研成果大量涌现,国际间的交流越来越快捷、方便,同时,越来越多的作者询问《热能动力工程》是否刊登外文版的论文,本刊编辑部为了适应技术交流的需求,将国内外先进技术在本文尽快报道,特此决定:从 2012 年起,《热能动力工程》将刊载外文版论文,欢迎踊跃投稿。

——《热能动力工程》编辑部

factors of the model. To a certain extent, there existed no so-called mismatch problems of the model, fully displaying the merits of non-linear controllers and providing a definite practical value for engineering projects. **Key words:** ARDC (active disturbance rejection controller), non-linear, uncertainty system, robustness, high order large time-delay system

模糊自适应内模控制在电加热锅炉温度控制中的应用研究 = **Study of the Application of the Fuzzy Self-adaptive Inner Model-based Control in the Temperature Control of an Electrically-heated Boiler** [刊, 汉] GUO Qi, REN Fang (College of Environment and Chemical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, China, Post Code: 066004), YANG Tian-feng, LIU Zhen-yong (Qinhuangdao Tonglian Industry Co. Ltd., Qinhuangdao, China, Post Code: 066102) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 449 ~ 452

In the light of such specific features of the temperature control in the clamping sleeve of an electrically-heated boiler as non-linear, time lagging and disturbance-susceptible etc., presented was a fuzzy self-adaptive inner model-based control method in the JX-300X DCS system. Through establishing an inner model, the fuzzy principles were utilized to make an on-line adjustment of the time constant T_f of the filter inside the inner model controller. The SCX language was adopted to design a program by using the fuzzy self-adaptive inner model-based control algorithm and a control test was conducted on a DCS (distributed control system) platform. The test results show that the performance of the fuzzy self-adaptive inner model-based control is enhanced greatly when compared with the conventional PID (proportional, integral and differential) control, featuring a quick response, a near-to-zero overshoot, a short regulation time duration, a high stabilization precision, a strong disturbance-resistant capacity and robustness. **Key words:** distributed control system, fuzzy self-adaptive inner-model-based control, PID (proportional, integral and differential) control

流化床 O_2/CO_2 燃烧(I)-高氧浓度下的燃烧实验 = **O_2/CO_2 Combustion on a Fluidized Bed (I)-Combustion Experiment at a High Oxygen Concentration** [刊, 汉] ZHAO Ke, LU Qing-gang (Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190), DUAN Cui-jiu (Postgraduate College, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2011, 26(4). - 453 ~ 456

To provide reference for the combustion at a high oxygen concentration in a large-sized circulating fluidized bed O_2/CO_2 combustion systems, experimentally studied were the combustion and temperature distribution characteristics of three types of coal at a high oxygen concentration in the O_2/N_2 atmosphere in a circulating fluidized bed-based com-