

基于模糊自整定PID的小型 燃气热水锅炉燃烧控制研究

袁丽艳¹, 李子建^{2†}, 李登泰³

(1. 山东电子职业技术学院, 山东 济南 250200; 2. 山东建筑大学信息与电气工程学院, 山东 济南 250101;

3. 山东太祥阀门有限公司, 山东 济宁 272100)

摘要: 燃气热水锅炉作为一种以燃气为燃料的供热设备, 可以显著降低环境污染, 符合社会对清洁能源的日益增强的需求。同时燃气锅炉系统是复杂非线性的多输入多输出系统, 其中燃烧控制系统是锅炉运行中至关重要的组成部分。本文对某小型燃气热水锅炉系统进行了研究, 建立了锅炉的系统模型, 设计了基于STM32F407单片机的锅炉燃烧控制系统, 并且根据其特点, 设计了模糊自整定PID控制算法。由仿真对比实验表明, 设计的控制方法表现出稳定的性能, 在超调量和调节时间等控制性能方面均优于传统的PID控制方法。

关键词: 燃气热水锅炉燃烧控制; 模糊自整定PID控制; PID控制

中图分类号: TP39

文献标识码: A

Research on Control Methods of Small Gas Hot Water Boiler Combustion Control System Based on Fuzzy Self-tuning PID

YUAN Liyan¹, LI Zijian^{2†}, LI Dengtai³

(1. Shandong Electronic Vocational and Technical College, Jinan, Shandong 250200, China;

2. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China;

3. Shandong Taixiang Valve Co., Ltd., Jining, Shandong 272100, China)

Abstract: As a heating equipment using gas as fuel, gas hot water boiler can significantly reduce environmental pollution and meet society's increasing demand for clean energy. At the same time, the gas boiler system is a complex nonlinear multiple-input multiple-output system, in which the combustion control system is a crucial component in boiler operation. This paper takes the small gas-fired hot water boiler system as the research object, establishes a system model of the boiler, designs a boiler combustion control system based on STM32F407 single chip microcontroller, and designs a fuzzy self-tuning PID control algorithm based on its characteristics. Simulation and comparative experiments show that the control method designed in this paper has stable behavior and is better than the traditional PID control method in terms of control performance such as overshoot and adjustment time.

Key words: gas hot water boiler combustion control; fuzzy self-tuning PID control; PID control

燃气热水锅炉的运行原理是将燃气点燃, 产生的高温热气通过热交换器在传递给水, 是常见的供

热设备, 可以显著降低环境污染, 符合社会对清洁能源的日益增强的需求。与燃煤锅炉相比, 燃气锅

炉的占用空间小,烟尘排放少、运行噪声低、效率高等特点,更切合国家相关环保政策,使其更适合于住宅和工业应用^[1]。此外,燃气锅炉在运输和装配方面也表现出便利性,为用户提供了一种更为便捷、清洁的供暖选择。随着社会对环保的关注和对清洁能源的需求不断增长,燃气锅炉有望在未来取代传统燃煤供热设备,为降低大气污染和温室气体排放做出积极贡献^[2]。

同时燃气锅炉系统是复杂非线性的多输入多输出系统,还具有延时性^[3],对于大型锅炉,通常选择 PLC 或者计算机作为系统的控制核心,这两个控制器拥有卓越的数据处理和计算能力,使其能够有效实施开发人员预设的控制算法。通过实时监测、反馈和调整,可以确保大型锅炉系统的运行更加可靠安全,控制性能更加优异。

对于燃气锅炉系统的控制方法的研究一直在进行,近年来,新兴的控制方法将智能控制和传统方法相结合,得到更令人满意的控制效果。文献[4]使用 ADRC 完成了对燃烧锅炉的组合控制,得出了 ADRC 的动静态指标皆优于 PID。文献[5]使用 ITGC 控制方法对锅炉水位控制系统进行控制,得出 ITGC 的控制性能较传统控制方法更佳。文献[6]对发电机组的燃气锅炉使用 RBF 网络进行建模,结合人工鱼算法,对燃烧系统进行优化,提高了锅炉运行效率,降低了 NO_x 排放量。文献[7]建立了二输入二输出的锅炉系统结构,并且使用模糊 PID 算法对锅炉燃烧系统进行控制。文献[8]对燃烧系统采用传统 PID 进行控制,对锅炉的液位系统采用模糊 PID 进行控制。

本文选择小型锅炉样机进行研究,小型燃气锅炉燃烧系统的控制算法基本使用 PID 控制算法,PID 控制算法是一种广泛应用于工业控制和自动化系统中的经典算法。其具有易实现、稳定性好、通用性强等特点。

然而,燃气锅炉系统是具有延时性且多变量耦合性的复杂系统,这进一步增加了实现理想控制的难度,由于参数整定较为困难,所以传统 PID 在这一应用场景下仍然有优化的空间。因此本文采用传统 PID 与模糊控制结合的方法对小型锅炉燃烧系统进行温度控制。

1 小型燃气锅炉燃烧控制系统的分析与设计

燃气锅炉系统牵涉到多个输入和输出,以及相互交织的多回路元素,是一个多回路和非线性的复

杂系统^[9]。系统的输入方面涵盖了输入的燃气量和输入的送风量,而输出则包括锅炉的出水温度和排出的烟气中的含氧量等。在这个运行过程中,燃气的品质和负荷的波动也是系统中不可忽视的关键因素之一^[10]。这些输入参数的变化与波动都会对系统的输出量产生影响,该系统输入与输出关系如图 1 所示。

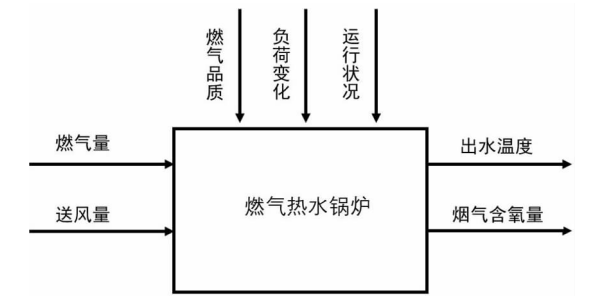


图 1 锅炉输出与输入之间的相互关系示意图

本文研究的燃烧控制系统是锅炉运行中至关重要的组成部分。判断燃烧控制系统的好坏主要看系统在能稳定运行的情况下是否可以实现对供水温度的准确控制和保证锅炉的高热能利用效率。本文设计的燃气热水锅炉燃烧控制系统主要由单片机控制核心和被控设备组成。本文围绕 STM32F407 芯片,设计供电电路、晶振电路、外围控制电路、复位重置电路等,从而组成完整的单片机控制核心。被控设备由温度传感器,风机和燃气调节阀等组成^[11],燃烧控制系统如图 2 所示。

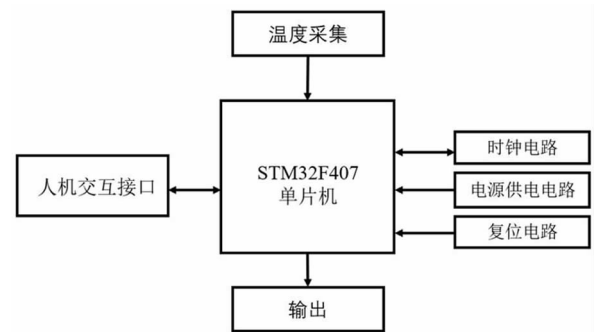


图 2 燃烧控制系统结构简图

燃烧系统所需最重要的传感器是温度传感器,单片机控制核心可以通过温度传感器检测到锅炉内的水温。将控制算法编写成程序,下载至单片机,单片机在按键和外围电路等的工作下,可以完成水温的预设,根据实时变化的温度检测量,燃烧系统的控制核心计算得到正确的输出控制量,单片机通过控制电路与被控设备连接,进而可以实现实时控制燃气比例阀和风机的精确运行状态,进而调

整燃气进气量和输入风量,让燃气输入量和输入风量达到理想的比例,保证充分燃烧的状态,燃气燃烧后实现预设的热量释放,实现对出水温度的准确控制^[12]。

2 锅炉燃烧系统控制算法设计

2.1 模糊控制基本原理

模糊控制是一种模拟人的模糊思维和决策过

程的控制算法。该方法的最重要的部分是对被控系统模糊规则的建立,这些规则来自操作者和专家的经验。该方法在得到经过模糊化处理后的输入信号之后,可以根据专家或工程师建立的模糊控制规则进行模糊推理,在经过反模糊化后,可以得到相应的输出控制量。模糊控制适用于复杂的、非线性的系统,以及那些具有模糊、模糊边界或不确定性的问题,因此非常适合对燃气锅炉这个复杂系统进行控制。该算法的基本原理如图 3 所示。

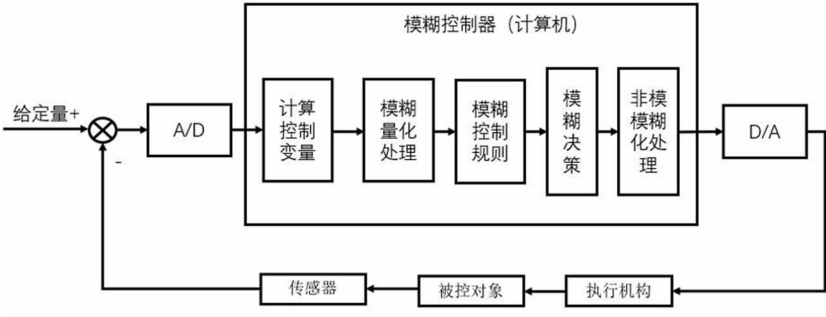


图 3 模糊控制的基本原理框图

2.2 传统 PID 控制算法

PID 控制是对系统当前的误差 $e(t)$ 来决定控制输出 $u(t)$ 的经典算法,PID 控制器通过比例(Proportional)、积分(Integral)、和微分(Derivative)三个运算部分来调整系统的输出,使系统稳定并迅速响应设定值,这三项运算的加权系数分别是 K_p 、 K_i 、 K_d 。控制器最后输出的控制信号 $u(t)$ 是这三个项运算的加权和,其原理图如图 4 所示。

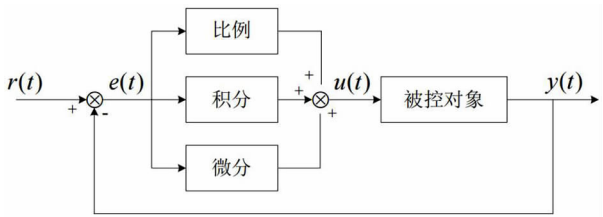


图 4 PID 控制的基本原理框图

PID 控制器的具体数学表达式为式(1):

$$U(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^T e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

2.3 模糊自整定系统设计

2.3.1 模糊自整定系统原理介绍

通过上文对小型锅炉系统的分析和模型的建立,本文为锅炉燃烧系统设计了一种模糊自整定控制器。模糊自整定控制器也就是将传统 PID 和模糊控制这两种方法结合在一起,模糊自整定控制器通过模糊规则和自适应机制,能够在运行时动态地调整控制参数,从而降低对参数设定的敏感性,提

高系统性能的鲁棒性和适应性。这种特性使得模糊自整定控制器在面对复杂、时变的系统时具有一定的优势。因此可以用模糊自整定控制器改善对锅炉燃烧控制的系统性能,其系统结构图如图 5 所示。

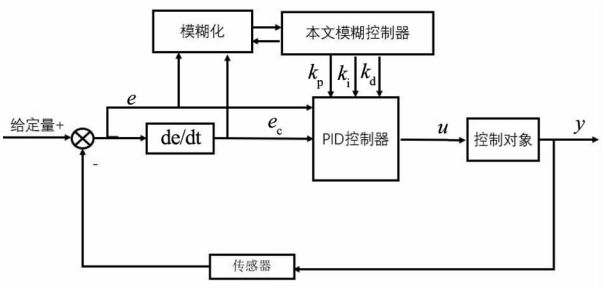


图 5 模糊 PID 控制系统结构图

本文中设计的模糊自整定控制系统有两个输入变量和三个输出变量。这两个输入变量分别是水温误差 e 和其变化率 e_c ,而三个输出变量对应于三个 PID 控制器所需的参数的调整量 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d ,因此本文设计的控制器相当在传统 PID 控制器的基础上附加自动整定参数的功能,进而输出合理的 u 给控制对象,使得水温可以控制在给定的目标值。

2.3.2 模糊化处理

燃气锅炉燃烧控制系统的输入信号是通过传感器测量得到的,输送给单片机的信号是确定的数字量,而图 5 可知,在模糊 PID 系统的正常工作需

要将 e 和 e_c 转化成模糊量。

在模糊自整定 PID 控制系统中,系统的两个输入参数被定义为温度误差 e 和其变化率 e_c ,用于系统输入的基本参数。根据锅炉的实际运行状况,温度误差 e 的实际变化区间为 $[-70, 70]$,而温度误差变化率 e_c 的实际变化区间为 $[-10, 10]$,一般将实际输入值的取值区间规定为基本论域,因此 e 和 e_c 的基本论域等于其实际变化区间。设定 e 和 e_c 的离散模糊论域均为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。基本论域和模糊论域已经设定好了,还需要设定量化参数,就可以完成从 e 和 e_c 的基本论域到模糊论域的转变。论域之间的转换之后可以方便模糊系统进行模糊推理,本文设定量化参数 S_e 和 S_{ec} ,二者的计算如式(2)和式(3)所示。

$$S_e = \frac{E_n}{e} = \frac{6}{70} = 0.085$$

(2)

$$S_{ec} = \frac{E_m}{e_c} = \frac{6}{10} = 0.6$$

(3)

2.3.3 模糊控制规则的设计

模糊规则的正确建立很重要,这关系到对燃气

锅炉燃烧控制系统是否能稳定运行和反应迅速,输入量 e 和 e_c 。在论域 $[-6, 6]$ 区间内均采用 zmf 型隶属度函数、三角隶属度函数和 smf 型隶属度函数的组合形式。本文设定的论域内的隶属度函数如图 6 所示。

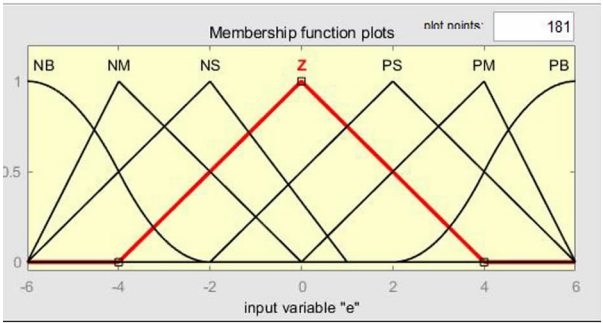


图 6 e, e_c 隶属度函数图

经多次实验,得知模糊控制器的三个输出量 $\Delta kp, \Delta ki$ 和 Δkd 的实际论域分别为 $[-0.45, 0.45], [-0.057, 0.057], [-3, 3]$, 本文设定输出量的模糊论域均为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。

在完成对模糊系统的各变量的论域设置后,下面建立模糊系统的模糊规则,如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表

e	e_c						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	Z/Z/NM	Z/Z/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/NB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	Z/Z/	NS/Z/Z
NS	PM/NB/Z	PM/NM/NS	PS/NS/NM	PS/NS/NM	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NS/PS/Z
Z	PM/NM/Z	PM/NM/NS	PS/NS/NS	Z/Z/NS	NS/PS/NS	NM/PM/NS	NM/PM/Z
PS	PS/NM/Z	PS/NS/Z	Z/Z/Z	NS/PS/Z	NS/PS/Z	NM/PM/Z	NM/PB/Z
PM	PS/Z/PB	Z/Z/NS	NS/PS/PS	NM/PS/PS	NM/PM/Z	NM/PB/PS	NB/PB/PB
PB	Z/Z/PB	Z/Z/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

模糊输出量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的隶属度函数选择均匀分布的三角函数 trimf, 其在论域内的分布函数如图 7 所示。

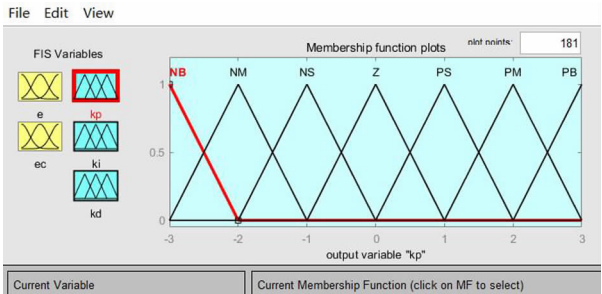


图 7 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 隶属度函数图

在采用加权平均值法对模糊系统的输出进行反模糊化后,还需要设置一个转换因子 T ,在采用加权平均值法对模糊系统的输出进行反模糊化后,还需要设置一个转换因子 T ,将控制器的输出乘上 T ,就可以得到 PID 控制器所需的三个参数的调整量,转换因子 T 的计算式为:

$$T = \frac{u}{L}$$

(4)

由公式可知转换因子可以由控制增量的基本论域除以论域的转换档量 L 得到,本文设定 L 等于 3,根据输出量的实际区间范围,计算得到三个参数的转换因子为 $T_p=0.15, T_i=0.019, T_d=1$ 。

完成上述步骤后,在运行本文设计的模糊自整定 PID 控制系统前,先给定 PID 参数的初值,即 k_{p_0} 、 k_{i_0} 、 k_{d_0} ,模糊自调整系统运行后的 PID 参数 k_p 、 k_i 、 k_d 的计算方法如下面式(5),式(6),式(7)所示:

$$K_p = K_{p_0} + T_P \cdot \Delta K_P$$

(5)

$$K_i = K_{i_0} + T_i \cdot \Delta K_i$$

(6)

$$K_d = K_{d_0} + T_d \cdot \Delta K_d$$

(7)

3 模糊自整定控制器 MATLAB 仿真

3.1 小型燃气锅炉燃烧系统的模型建立

燃气热水锅炉是一个非线性,具有延时性且多变量耦合性的复杂系统^[13],查阅资料得到,系统的温度控制模型一般为一阶滞后或者二阶滞后系统,本文通过调节燃气控制阀门开度,得到样品锅炉的

炉温变化曲线,再对锅炉系统进行辨识,确定燃气热水锅炉系统的传递函数模型为:

$$G(S) = \frac{2.5e^{-6s}}{(50S^2 + 60S + 1)}$$

(8)

3.2 模糊自整定 PID 与 PID 系统仿真搭建与分析

在 MATLAB 中使用 simlink 模块,分别搭建传统 PID 控制器和模糊 PID 控制的模型,仿真模型中的模糊控制器加载事先编辑好的 mohu. fis 文件,其中 mohu. fis 文件的创建过程为:先打开模糊控制工具箱的交互式图形界面,使用该工具箱完成模糊规则表的创建,输入、输出量的论域设定及隶属度函数的参数设定后。再根据式(8)在仿真软件中搭建锅炉系统的仿真模型,将上述两种方法分别作用于被控系统模型,在 simlink 仿真中给定阶跃输入信号,通过 scope 模块观察输出响应波形,系统运行的仿真模型如图 8 所示。

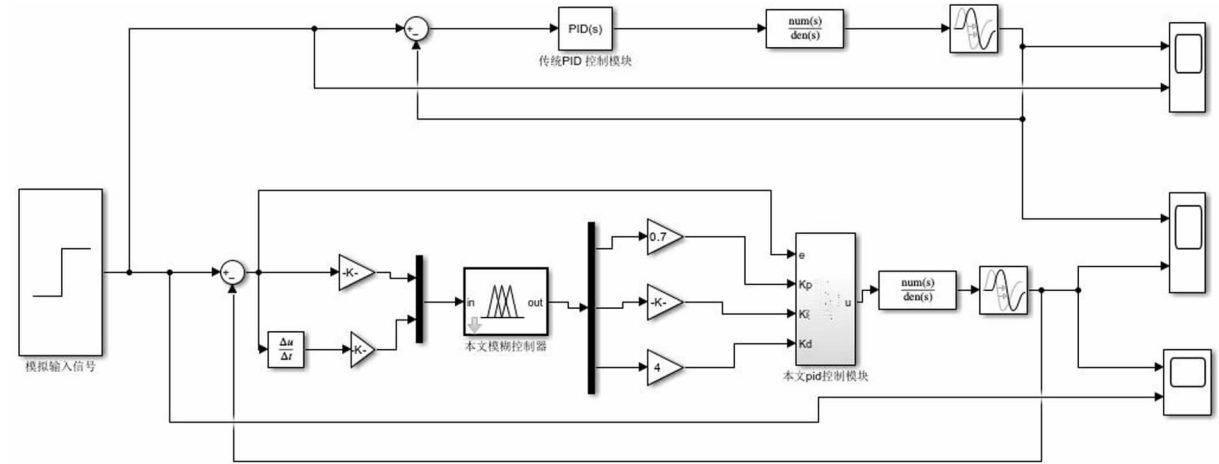


图 8 系统仿真模型图

结合实际工程经验和仿真调试,本文选取两组参数进行传统方法和被本文设计的方法进行仿真,第一组参数为 $k_p=0.3$, $k_i=0.018$, $k_d=4$,设定目标供水温度为 60°C ,运行结果如图 9 所示。经过计算,由 PID 方法控制的系统的运行超调量为 20.5% ,调节时间为 310 s ,本文设计的控制器的超调量为 3.93% ,调节时间为 158 s 。

第二组参数设置为 $k_p=0.4$, $k_i=0.05$, $k_d=4$,给定目标供水温度为 60°C ,仿真结果如图 10 所示。使用 PID 控制器的系统运行之后的超调量为 44.76% ,调节时间为 388 s ,本文设计的控制器的超调量为 3.33% ,调节时间为 189 s 。

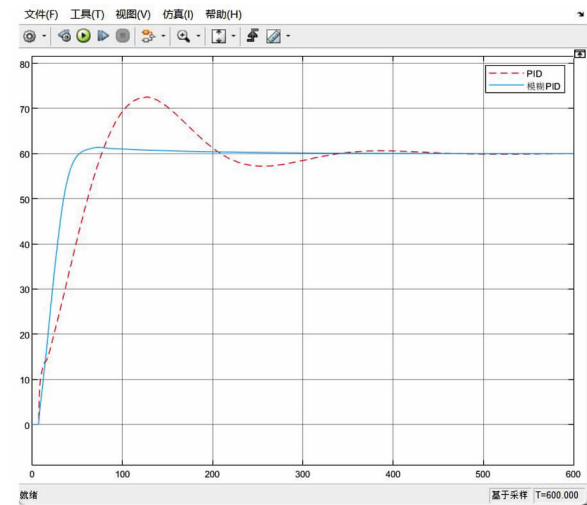


图 9 PID 参数为 $k_p=0.3$, $k_i=0.018$, $k_d=4$ 的响应图