

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105744

# 基于增量式 PID 控制的锅炉温控系统设计\*

宋安然<sup>1</sup> 周德廉<sup>1</sup> 刘艳梨<sup>2</sup>

(1.宿迁学院 机电工程学院 宿迁 223800; 2.江苏安全技术职业学院 徐州 221000)

**摘要:** 针对传统水温调节多采用人工经验以及半电气自动化等方式,以及这些方式存在结构单一、水温波动较大以及稳定性差等问题,设计一种基于增量式 PID 修正控制系统。控制系统基于增量式 PID 修正控制系统采用热电阻作为温度敏感元件,为减少热电阻本身导线电阻引起的测量误差,采用基于三线制的热电阻温度数据采集电桥电路。由于热电阻存在一定的非线性区间,根据实验温度数据与其热电阻本身电阻比较,计算出其修正系数,以此减少数据输出误差。最后设计并制作实验样机,结果表明根据样机获得的数据验证理论分析的正确性。

**关键词:** PID 控制;增量式;热电阻

**中图分类号:** TM93 **文献标识码:** B **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Design of boiler temperature control system based on incremental PID control

Song Anran<sup>1</sup> Zhou Delian<sup>1</sup> Liu Yanli<sup>2</sup>(1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Suqian College, Suqian 223800, China;  
2.Jiangsu College of Safety Technology, Xuzhou 221000, China)

**Abstract:** The traditional water temperature regulation adopts manual experience and semi-electrical automation. These methods have the problems of single structure, large water temperature fluctuation and poor stability. Therefore, a PID correction control system based on increment is designed. Based on incremental PID correction control system, thermal resistance is used as temperature sensitive element, and a three-wire thermal resistance temperature data acquisition bridge circuit is designed. According to the experimental temperature data and its thermal resistance, the correction coefficient is calculated to reduce the data output error. Finally, the experimental prototype is designed and made to verify the correctness of the theoretical analysis according to the data obtained from the prototype.

**Keywords:** PID control; increment; thermal resistance

### 0 引言

工业上传统锅炉温度调控多采用人工或半电气自动化等方式进行,这种方式结构单一,由于人工调控存在一定的人为因素,会产生较大的温度波动,因此不适合对温度要求较高的锅炉应用中<sup>[1]</sup>。电气半自动化方式一般以电气定时器、PLC 以及各种开关量组件构成,这种方式具有一定的优势,较人工调节速度快、效率高等,但也存在一些缺点,比如系统构成成本要高,且温度调节速度、误差等级受电气硬件自身的性能影响。因此,半电气自动化方式仍不能满足现代工业温度调控要求。而近代半导体、微处理器以及传感技术的发展,基于半导体温度检测元件以及

微处理器技术的温度调节、控制的研究不断在实际工业中广泛应用<sup>[2]</sup>。温度是当前化工、制药等行业中重要的一项工艺参数,化工或制药过程中的工艺对水的温度有一定的要求。PT100 作为一种较为常用的一种测温元器件,其精度高,测量温度范围较宽,但也存在一些非线性特性,文献<sup>[3]</sup>提出一种基于 PT100 的动态热响应模型模拟实际的温度输出特性,以此提高温度输出精度。文献<sup>[4-6]</sup>针对温度具有滞后的特性,提出基于 PT100 的自适应与数字滤波的方法提高输出响应时间。本文提出了一种基于增量式 PID 修正技术的温度调控系统<sup>[7]</sup>,采用 PT100 作为温度采集元件,并采取温度分区比例修正的方式确保温度输出的准确性。

收稿日期:2021-01-26

\* 基金项目:国家自然科学基金(51975277)、宿迁市科技计划(K201913)、宿迁学院转子泵的轻量化研究与设计创新团队项目(2021TD07)资助

### 1 总体设计

本系统主要实现锅炉中高温水经管道与冷水混合后,输出一定温度水的目的。根据系统要求,首先,要实现两路温度检测,温度传感器采用热电阻为基础的 PT100 作为温度敏感元件,其具有温度范围广、精度高等优点。其中一路检测锅炉内水的温度,另外一路检测混合之后出水口处的温度。其次,在高温水与冷水混合冷却管道之间增加具有开度控制开度阀,该控制阀主要用于执行系统输出的结果,控制阀由直流电机驱动,开度范围表示由霍尔元件对电机主轴上磁钢计数实现。最后,需要对当前的温度进行监控,需要设计显示界面,通过微处理器的串口连接至 PC 进行数据分析与显示。本系统总体构成如图 1 所示。

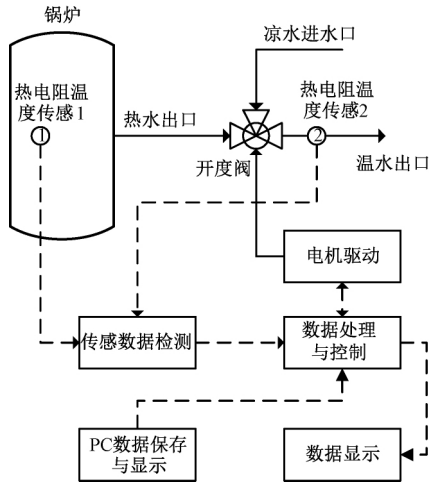


图 1 系统结构

### 2 子系统设计

#### 2.1 温度采集系统

系统要求实现两路温度检测,一路检测锅炉内水的温度,防止锅炉内水温过低、过高;另外一路则检测出水口温度,以此实现出水口恒温控制。目前温度测量主要分为接触式与非接触式,接触式主要以直接与测量物之间通过物理接触实现测温,比如常用热电阻、热电偶都是接触式测量。非接触式测量主要利用光、热辐射等方式实现测温,比如利用光纤以及红外测温等方式<sup>[8-9]</sup>。本系统采用基于热电阻的 PT100 接触式测温传感器作为测温单元,其精度高且易于制作成各种形状以适应不同的物体表面。PT100 微小的电阻变化都有较大的温度影响,所以在设计时需要考虑引线自身电阻的影响,在采集系统中采用三线 PT100 进行设计,以抵消元件引线所引起的电阻误差。

如图 2(a)所示为两线制 PT100 接线方式,其两个接线点 1 与 2 分别接至电桥左桥臂,由在工业现场需要远距离布线,其导线本身的电阻将影响热实际温度测量,图 2(a)中的  $R'$  为导线的电阻,若采用两线制方式进行温度测量,

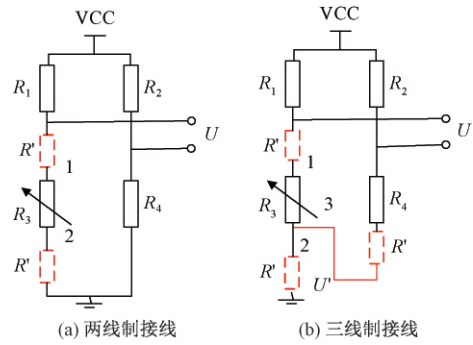


图 2 热电阻 PT100 接线原理

则其电压输出为:

$$U = VCC \left[ \frac{R_1 + 2R'}{R_1 + R_2 + 2R'} - \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right] \quad (1)$$

在精确的应用场合中,两线制接线方式由于导线电阻的影响,存在较大的偏差,两线制适合温度精度要求不高的场合。为了解决两线制带来的问题,将采用三线制方式,图 2(b)为三线制接线方式<sup>[10-11]</sup>。在两线制的基础上,将其任一端点再引出同样长度的接线端子,并将这一端子接入电桥的右桥臂,由此实现在左桥臂与右桥臂都具有相等的导线电阻,以此实现两个桥臂电阻平衡,三线制接法可以抵消两个桥臂电阻不平衡,则三线制接法输出电压为:

$$U = [VCC - U'] \left[ \frac{R_3 + R'}{R_1 + R_3 + R'} - \frac{R_4 + R'}{R_2 + R_4 + R'} \right] \quad (2)$$

其中,  $U'$  为导线电阻上的分压。

选用电桥对 PT100 进行电阻测量,由于温度变化引起的电阻变化量比较弱,需要对其输出的电压信号进行放大,最后将放大的电压信号送入 AD 模拟转换器中进行转换,并将转换后的数据送入控制器进行运算,如图 3 所示为温度采集硬件结构。

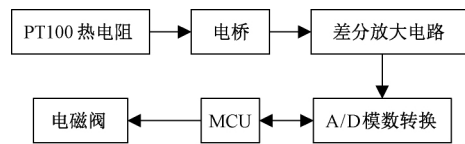


图 3 温度采集硬件结构

根据 PT100 热电阻的输出特性,采用 AD 公司的 AD623 差分放大器,其具有较高的输入阻抗以及较宽的带宽,满足微弱信号的采集要求,如图 4 所示为温度采集原理。

根据图 4 电路获得 30 °C ~ 90 °C 区间对应的电阻以及输出电压值,PT100 的主要成份为铂金属,其电阻与温度之间的关系具有非线性部分。由于 PT100 本身的参数影响,且自身为电阻元件,流经的电流将在 PT100 产生热量,其发热温升将导致输出误差,所以需要对该电路进行修正,温度输出如图 5 所示。



合中被广泛使用<sup>[12]</sup>。PID 矫正控制器由比例、积分与微分 3 个环节共同实现,其输入与输出之间的关系为:

$$u(t) = k\epsilon(t) + \frac{k_p}{T_i} \int_0^t \epsilon(t) dt + k_p T_d \frac{d\epsilon(t)}{dt} \quad (4)$$

其中,  $K_p$  为比例系数,  $T_i$  为积分时间系数,  $T_d$  为微分时间系数。

PID 控制器可以由多种装置实现,由于本系统选用数字微控制器做为控制核心硬件,所以需将模拟 PID 控制方式转换为数字 PID 控制方式,即对模拟系统进行离散化处理,它与模拟系统的区别在于处理器处理的信号是离散信号。图 7 为基于 PID 矫正技术的控制器结构。

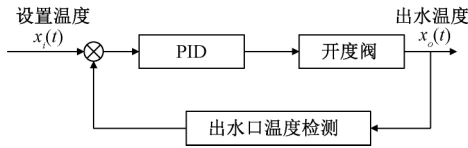


图 7 基于 PID 控制器结构

在 PID 离散过程中,采用矩形面积求和方式来近似积分计算,采用后向差分方式近似微分计算,则其积分与微分分别表示为:

$$\int_0^t \epsilon(t) dt = \sum_{i=0}^k T_0 \epsilon(k-i) \quad (5)$$

$$\frac{d\epsilon(t)}{dt} = \frac{\epsilon(k) - \epsilon(k-1)}{T_0} \quad (6)$$

其中,  $T_0$  为系统采样周期,且采样周期远小于信号的变换周期。根据 PID 控制器输入与输出之间的关系式(4),可以将其变换成差分方程的方式,即:

$$u(k) = k_p \left[ \epsilon(k) + \frac{1}{T_i} \sum_{i=0}^k T_0 \epsilon(k-i) + T_d \frac{\epsilon(k) - \epsilon(k-1)}{T_0} \right] \quad (7)$$

$u(k)$  为 PID 控制器的全量输出,其输出量为被控对象每次采样时刻到达的最终值,被称为位置式 PID。位置式 PID 的输出与过去几乎所有的状态有关,在数字控制系统中需要耗费大量的存储单元,将增加系统的控制成本。为减少系统的控制成本,对位置式 PID 算法进行变换,使其每次的输出为上次输出的增量,这种控制方式被称为增量式 PID。根据位置式控制输出关系式(7),给出第  $k-1$  次采样时刻的输出,即:

$$u(k-1) = k_p \left[ \epsilon(k-1) + \frac{1}{T_i} \sum_{i=0}^{k-1} T_0 \epsilon(k-1-i) + T_d \frac{\epsilon(k-1) - \epsilon(k-2)}{T_0} \right] \quad (8)$$

用式(7)减式(8)得:

$$u(k) = u(k-1) + K_p [\epsilon(k) - \epsilon(k-1) + \frac{T_0}{T_i} \epsilon(k) + \frac{T_d}{T_0} [\epsilon(k) - 2\epsilon(k-1) + \epsilon(k-2)]] \quad (9)$$

式(9)即为增量式 PID 形式,增量式 PID 每次输出只

为上次输出的增量,将减少系统的计算量,且不会因系统故障出现温度突变情况<sup>[13-15]</sup>。

### 2.4 软件控制流程

软件部分控制流程主要包括数据初始化、温度采集、温度数据处理、增量式 PID 数据计算与输出、开度阀控制、数据显示、数据传输等主要流程。温度数据采集与转换主要利用 STC15 微控制器内部的 A/D 转换模块实现,其转换后的数据经过数字低滤波后送入增量式 PID 部分进行计算输出,输出的结果转换成对应的控制信号送入开度阀进行控制,以此实现温度调控。控制流程如图 8 所示。

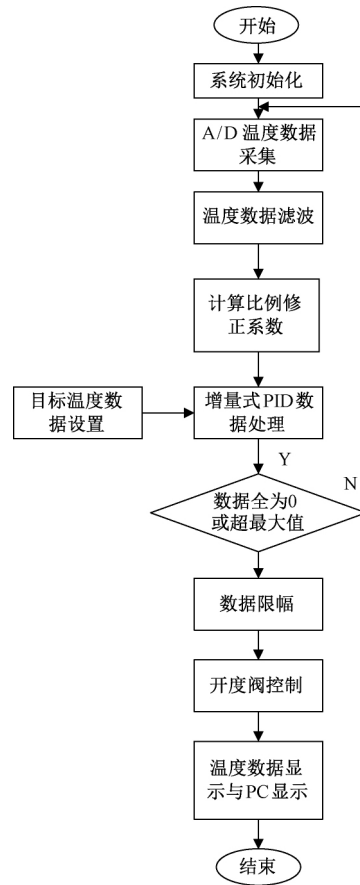


图 8 控制流程

### 3 实验验证与分析

为验证系统控制分析的正确性,采用 ADI 公司的 AD623 差分放大器作为 PT100 热电阻温度转换的主要放大器元件,转换后的数据送入至微控制器中,同时将数据传送至 PC 进行显示。样机实物如图 9 所示。主要设计参数为:PT100 转换电桥基准电压为 3.75 V;AD623 转换放大增益为 20 倍;温度采集模块部分样机如图 10 所示。

确保实验数据的准确,给出样机实验环境参数,如表 2 所示。

在样机测试中,锅炉内温度设置为 90 °C,设置出水口

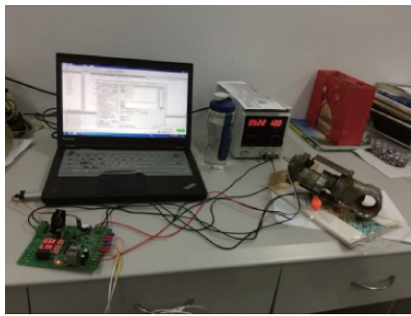


图 9 样机实物

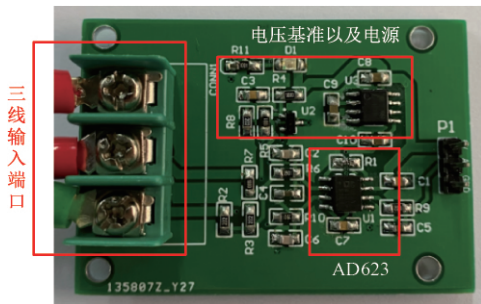


图 10 温度采集模块

表 2 温控系统实验环境参数  $^{\circ}\text{C}$

环境温度	$20 \pm 5$
设置温度	40
锅炉内温度	$90 \pm 10$

温度为  $40^{\circ}\text{C}$ , 测量开度阀的开度数据以及出水口温度变化数据。根据样机获得的采用修正系数以及未修正的 PT100 输出数据如表 3 所示, 表明修正后的误差明显小于修正前的数据, 精度明显提高。

表 3 采用修正系数的 PT100 温度输出数据对比

误差输出项	修正后	未修正
温度输出最大误差/ $^{\circ}\text{C}$	$\pm 1.5$	$\pm 1.5$

在加入 PID 矫正环节之前, 控制系统未能很好地跟踪目标的输入, 其出水温度将出现较大的温度误差。由于 PID 矫正环节具有微分与积分环节, 可以较好地跟踪输入的变化做出及时响应, 表 4 为加入 PID 矫正环节前后出水口温度的最大误差。

表 4 加入 PID 矫正环节前后出水口温度的最大误差

输出性能	加入 PID 矫正环节	未加入 PID (电气闭环)
调节时间/T	3.3	20
出水温度稳态误差/ $^{\circ}\text{C}$	$\pm 3.5$	$\pm 8$

出水口温度变化与开度数据变化之间关系如图 11 所示。

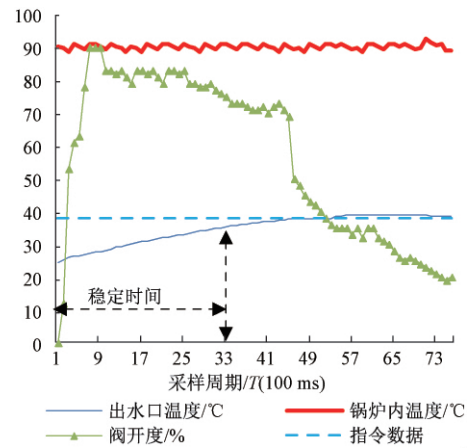


图 11 出水口温度与开度输出

图 11 中指令数据为 PID 中设置的目标温度, 即为出水口设定温度。在室温  $25^{\circ}\text{C}$  左右条件下, 指令数据设置为  $40^{\circ}\text{C}$ , 锅炉内温度为  $90^{\circ}\text{C}$ 。在系统初始阶段, 系统的温度误差较大, 此时 PID 输出最大的开度, 由于系统设置了限幅, 所以开度被设置为最大 90%, 系统经过 900 ms 左右达到最大并维持了约 200 ms, 在经热水混合后水温开始上升, 经过 3.3 s 左右出水口温度接近指令数据, 此时的系统稳定时间为 3.3 s。由于水温系统属于滞后系统, 采样时间设置为 100 ms, 可以减少简化系统计算量。

#### 4 结 论

本文采用增量式 PID 矫正控制器设计了一种水温调控系统, 并给出了系统总体控制结构, 同时对其总体进行了实验验证。系统采用热电阻 PT100 作为主要温度检测元件, 并设计基于三线制的热电阻温度数据采集电桥, 通过温度数据与其本身电阻比较给出修正系数, 减少温度数据误差。选用 PID 矫正作为主要算法, 并对其进行离散化计算, 获得其增量式 PID 输出形式。最后给出了样机设计参数并制作样机实物, 实验结果表明, 在常温条件下系统能够较快实现温度调控, 验证了理论分析的正确性。本文仍有需要继续深入探讨部分, 由于温度控制具有较大的滞后性, 为提高系统的动态响应, 可以后续采用 smith 滞后控制理论以及预测控制理论<sup>[16]</sup>进行研究, 可以作为以后的研究方向。

#### 参考文献

- [1] 区杰勇. 广义预测控制在电热锅炉温度控制中的应用研究[D]. 上海: 东华大学, 2020.
- [2] 张琦, 史林军. 工业锅炉温度控制系统设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2020, 39(8): 25-28.
- [3] 朱杰, 郭涛. 一种 Pt100 温度传感器的动态热响应模型[J]. 传感技术学报, 2013, 26(1): 73-77.
- [4] 凌菁, 滕召胜, 张凯旋. 基于 Pt100 的红外干燥箱动态温度补偿方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016,

- 30(4):542-549.
- [5] 张元良,修伟,郎庆阳.石油产品检测中 Pt100 温度传感器动态补偿研究[J].大连理工大学学报,2010,50(3):351-355.
- [6] 魏小宇,郑晟.运用灰色预测与模糊加权 PID 的反应釜温度控制[J].重庆理工大学学报(自然科学),2019,33(2):82-86.
- [7] 李盛伟,张来,梁海深.基于串级 PID 的相变储能电锅炉温度控制技术[J].热能动力工程,2020,35(8):85-89.
- [8] 陈文敏,夏应清,郎磊,等.基于 MLX90640 的高分辨率温度监测系统设计[J].仪表技术与传感器,2020(7):71-74.
- [9] 杨风健,刘军,貌程浩,等.基于 MLX90620 的多点动态温度监测系统设计[J].仪表技术与传感器,2015(12):75-78.
- [10] 王晓丹,孟令军,尹维汉,等.基于 ADS1148 的多路高精度测温装置[J].自动化与仪表,2014,29(12):66-68.
- [11] 唐友明,刘丹,何巨龙.基于 K 型热电偶的高精度测温放大电路设计[J].电子科学技术,2016,3(3):217-220.
- [12] 徐建明. PID 控制器及其设计方法研究[D].杭州:浙江工业大学,2003.
- [13] 李盛伟,张来,梁海深.基于串级 PID 的相变储能电锅炉温度控制技术[J].热能动力工程,2020,35(8):85-89.
- [14] 刘华,刘敏层.基于模糊 PID 在锅炉温度控制系统的仿真研究[J].自动化与仪表,2018,33(4):20-25.
- [15] 柯宏威,于兵.面向航空发动机热源模拟台的多路温度调控系统设计[J].电子器件,2020,43(2):408-413.
- [16] 王晗,郭奇,孟繁哲,等.预测模糊 PID 控制在常减压装置中的试验研究[J].控制工程,2020,27(9):1495-1501.

#### 作者简介

宋安然,硕士研究生,助理实验师,主要研究方向为电力电子技术。

E-mail:497795706@qq.com