

# 基于模糊 PID 的加热炉炉温控制系统的 PLC 设计与实现

王晓瑜<sup>1</sup>, 阎宇威<sup>2</sup>

(1. 西安航空学院 电子工程学院, 陕西 西安 710077;

(2. 西安建筑科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**针对炉温控制系统非线性、大惯性延迟、时变性的特点,提出了模糊 PID 控制器(Fuzzy - PID Controller)的控制策略,设计了流程图,使用 MATLAB 搭建控制器仿真模型,以 SIMATIC 1214C PLC 作为控制器,选用 SIEMENS Smart1000 IE V3 HMI, SIEMENS MM440 变频器,在 TIA Portal V15.1 环境下编写 PLC 控制系统程序,在 WINCC flexible SMART V3 环境下搭建 HMI 组态画面。实验结果表明,Fuzzy - PID Controller 的加热炉炉温 PLC 控制策略正确有效,升温状态无震荡、无超调,5 秒进入稳态,快速性同比提高 45%,稳态误差在 1% 范围变化,HMI 组态画面实时监控,实现控制加热炉炉温稳、准、快的控制目标。

**关键词:**加热炉;Fuzzy - PID Controller;温度控制系统;PLC;HMI

中图分类号:TD41

文章编号:1000 - 0682(2025)04 - 0036 - 05

文献标识码:A

DOI:10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2025.03.007

## Design and implementation of PLC based on Fuzzy - PID heating furnace temperature control system

WANG Xiaoyu<sup>1</sup>, YAN Yuwei<sup>2</sup>

(1. Electronic Engineering College, XI'AN Aeronautical Institute, Shaanxi Xi'an 710077, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Shaanxi Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Because the control process of reheating furnace temperature was nonlinear, time - varying and time delay, the Fuzzy - PID Controller control strategy was proposed, the flow chart was designed, and the controller simulation model was built based on MATLAB. SIMATIC 1214C PLC was the controller, Smart 1000 IE V3H was the HMI and SIEMENS MM440 was the inverter. The program was compiled by using TIA Portal V15.1 software. WINCC Flexible SMART V3 simulation operation was designed. Fuzzy - PID Controller's PLC control strategy for heating furnace temperature was correct and effective. The heating state has no oscillation or overshoot, entering steady state in 5 seconds, the speed has increased by 45%, the steady - state error varies within the range of 1%, at the same time, real - time monitoring can be carried out through HMI configuration screen. The goal of controlling the temperature, stability, and speed of the furnace was realized.

**Keywords:** heating furnace; Fuzzy - PID controller; heating furnace temperature control system; PLC; HMI

收稿日期:2024 - 02 - 22

基金项目:陕西省省级一流线下课程“PLC 原理及应用”(陕教[2021]107 号)

第一作者:王晓瑜(1974—),女,陕西西安人,博士,教授,现从事自动化教学与科研工作。

## 0 引言

随着我国综合实力不断增强,工业发展迅速,工业生产中的化工行业对电加热温控系统的低能耗及环保节能提出更高要求。文献[1]设计了一种使用

FPGA 芯片采集室内温度,利用模糊算法控制器,通过远程控制模块,完成较准确高效的控制室内空调温度方法;文献[2]的 PID 算法具有模糊自整定特性,由 Simulink 仿真验证该算法对温度的快速和稳态控制;文献[3]设计了模糊 PID 空调温度控制系统并以 PLC 做为控制器的实现方法,系统运行超调量小、响应速度快,满足纺织车间温度控制要求;文献[4]以 PLC 为主控制器,将人体温度通过温度传感器采集后,通过 PID 算法模糊化优化其最优值,PLC 驱动降温制冷器调节温度到最佳温度。仿真结果表明该降温方法有良好的调控效果;文献[5]设计的冷却液温度控制系统,由模糊 PID 算法通过 PLC 控制,实验表明,该系统调节速度快,误差小,有效实现系统的冷却和降温功能。但是文献[1]选用的控制器是 FPGA,文献[2]编程仿真验证了设计思路,没有通过搭建试验台测试;文献[3-5]虽提到以 PLC 实现,但未详细阐明控制系统的 PLC 程序设计、通讯以及上位机监控等问题。基于此,该文提出 Fuzzy - PID Controller 控制策略,构建控制器仿真模型,硬件以 SIMATIC 1214C PLC 作为控制器,选 SIEMENS Smart1000 IE V3 HMI,SIEMENS MM440 变频器,在博途环境下编写 PLC 控制程序,在 WINCC flexible SMART V3 环境下搭建组态画面。实验结果表明,基于 PLC 的模糊 PID 加热炉炉温控制系统的控制策略智能正确直观可视有效,实现控制加热炉炉温稳、准、快的控制目标<sup>[1-5]</sup>。

## 1 模糊 PID 控制器设计

### 1.1 模糊 PID 控制器结构

传统 PID 算法可以将系统稳态误差调控至零,但难以实现对非线性系统精确控制。Fuzzy - Control(模糊控制)具有非线性控制特性,但稳定性较差,两者叠加为 Fuzzy - PID 则更优。该文选用二维 Fuzzy - Controller,其结构见图 1。将系统的给定值  $r$  叠加单位负反馈  $y$ ,得到偏差  $e$ ,做微分运算后为偏差变化率  $ec$ 。将  $e$  和  $ec$  作为二维 Fuzzy - Controller 的输入,遵从 Fuzzy 规则,计算出在时变状态下, PID Controller 的 3 个输出增量参数:比例积分增量  $\Delta K_p$ 、积分增量  $\Delta K_i$ 和积分增量  $\Delta K_d$ 的值、并作用于 PID 控制器,以此实现对被控对象的调节。通过二维模糊控制器不断改变 PID 参数值,使 PID 参数紧密的跟随系统响应变化,从而达到很好的控制效果<sup>[6]</sup>。

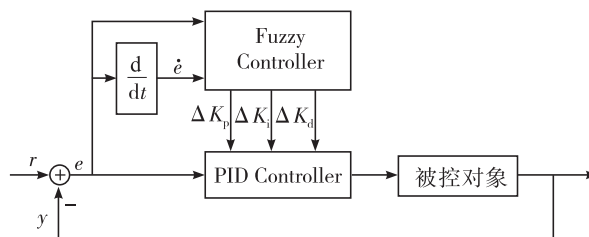


图 1 模糊 PID 控制器结构图

### 1.2 模糊 PID 控制器

#### 1.2.1 量化输入输出量、确定模糊子集

在控制器中,  $e$  和  $ec$  为输入,  $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$  为输出。在该次设计中,在多次仿真计算后,因  $K_d$  对于系统稳定无明显效果,故选用 PI 控制器。将  $e$  和  $ec$  的模糊离散论域定义为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ ,  $\Delta K_p, \Delta K_i$  的模糊离散论域定义为  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。之后确定每个参数的量化因子,使参数的实际论域与模糊论域相一致。通过对传统 PID 控制器进行仿真后得到  $e$  的实际论域为  $[-0.5, 1]$ ,  $ec$  的实际论域为  $[-0.25, 0.05]$ ,  $\Delta K_p$  为  $[-0.12, 0.12]$ ,  $\Delta K_i$  为  $[-0.012, 0.012]$ 。因此可以得出各量化因子的值:  $K_e = 0.04, K_{ec} = 0.1875, K\Delta k_p = 0.02, K\Delta k_i = 0.002$ 。得出量化因子后,根据各系数的模糊量将输入的模糊子集设定为  $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ , 将输出的模糊子集设定为  $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$ 。

#### 1.2.2 确定控制规则和模糊推理

传统 PID 控制的输出响应下,动态性能指标要求如下:在延迟阶段要求  $K_p$  值较大,较小超调,故  $K_i = 0$ ;在上升阶段要求  $K_p$  值较小,  $K_i$  值适当;在峰值及调节阶段要求  $K_p$  和  $K_i$  值较大;基于以上要求,为了让系统达到满意的控制目的,设计  $\Delta K_p$  和  $\Delta K_i$  模糊规则表,见表 1 和表 2<sup>[7]</sup>。

表 1  $\Delta K_p$  模糊规则表

		$ec$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$e$	NB	NB	NB	NS	PS	PB	ZO	NB
	NM	NB	NB	NS	PB	PB	NS	NB
	NS	NB	NB	ZO	PB	PS	NS	NB
	ZQ	NB	NB	ZO	PB	ZO	NB	NB
	PS	NB	NS	PS	PB	ZO	NB	NB
	PM	NB	NS	PB	PB	NS	PB	PB
	PB	NB	ZO	PB	PS	NS	NB	NB

表 2  $\Delta K_p$  模糊规则表

$ec \backslash e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	NB	ZO	PB	PB
NM	PB	PB	PS	PS	NS	PS	PB
NS	PB	PB	PS	ZO	NS	PS	PB
ZO	PB	PS	ZO	ZO	ZO	PS	PB
PS	PB	PS	NS	ZO	PB	PB	PB
PM	PB	PS	NS	PS	PB	PB	PB
PB	PB	ZO	NB	PB	PB	PB	PB

### 1.2.3 解模糊查询表

通过隶属度查询和模糊规则表,使用马丹尼推理法进行模糊推理,解模糊则使用加权平均数法最后,得到各输出的模糊控制查询表,这里仅列出  $\Delta K_p$  的查询表,见表 3。

表 3  $\Delta K_p$  模糊规则查询表

$ec \backslash e$	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	5.04	5.03	3	-3	-5.04	0	5.04
-2	5.04	5.03	3	3	-3	3	5.04
-1	5.04	5.03	3	0	-3	3	5.04
0	5.04	03	0	0	0	3	5.04
1	5.04	2.99	-2.99	0	5.04	5.04	5.04
2	5.04	2.99	-2.99	3	5.04	5.04	5.04
3	5.04	0	-5.03	5.04	5.04	5.04	5.04

### 1.3 MATLAB 仿真设计

该系统传递函数为  $G(s) = \frac{2}{s(s+1)}$ , MATLAB/SIMULINK 进行传统 PID Controller 及 Fuzzy - PID Controller 仿真搭建<sup>[7-9]</sup>。

#### 1.3.1 传统 PID 控制器仿真分析

搭建模型,设置输入为 100,仿真时间为 40 s,利用 PID 参数整定得到  $k_p = 0.135, k_i = 0.025$ ,系统的输出响应曲线见图 2。

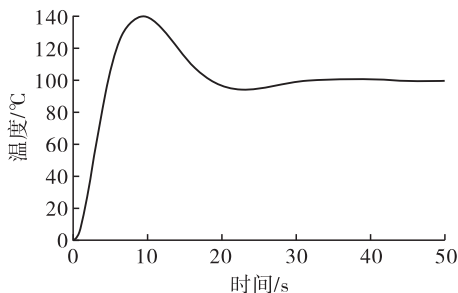


图 2 传统 PID 输出响应曲线

#### 1.3.2 模糊 PID 控制器仿真

SIMULINK 中搭建控制器仿真模型。根据  $e$  和  $ec$  的范围、设定参数的模糊论域设置为  $[-6, 6]$ ,进

行模糊控制器的设计:打开模糊逻辑设计工具箱,添加输入输出变量→在隶属函数编辑器中添加各参数的隶属函数→在模糊规则编辑器中添加模糊规则→仿真,得到 Fuzzy - PID Controller 输出响应曲线,见图 3<sup>[10-13]</sup>。

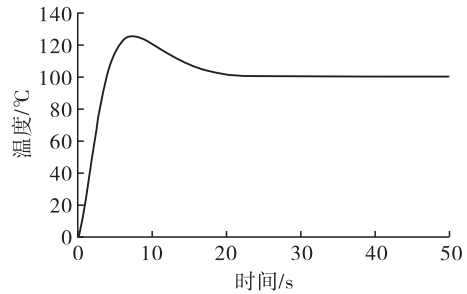


图 3 Fuzzy - PID Controller 输出响应曲线

对比图 2 和图 3,可以发现,传统 PID 控制器和模糊 PID 控制器输出响应曲线在同样条件下,模糊 PID 控制的动态性能指标都有所下降,其中超调量减小,同比提高 18%;系统大约在 16 秒进入稳定状态,快速性同比提高 45%;该方法有效性得证。

## 2 模糊 PID 加热炉炉温控制系统实验实现

### 2.1 系统总体方案设计

模糊 PID 加热炉炉温实验监控系统网络拓扑图如图 4 所示:温度传感器采集窑炉温度,传送至系统 S7 - 1200PLC,PLC 通过 A/D 模数转换处理,将采集的温度通过以太网实时显示在本地 HMI 上;在 HMI 界面输入设定窑炉温度,控制 PLC,通过 Modbus 通信协议,调节变频器频率实现加热炉温度的实时控制。

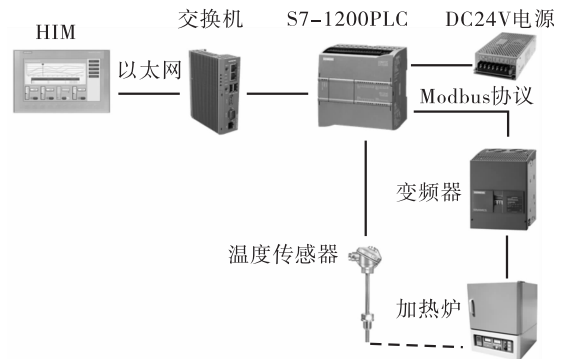


图 4 系统拓扑图

### 2.2 硬件系统设计

主控制器选用西门子 SIMATIC 1214C DC/DC/DC PLC;选用西门子 CM1241 RS485 模块 + 通信板 CB1241 + 多功能交换机实现通信;人机界面选用西门子 Smart 1000 IE V3,变频器选用西门子 SIEMENS MM440,选用 PT100 一体式温度传感变送器、300W

镍铬合金电阻丝加热炉、不锈钢炉壁各 1 个。

### 2.3 软件系统设计

上位机在 TIA Portal V15.1 环境下编写炉温加热系统的 PLC 程序,由 MAIN 主程序、温度采集中断程序和人机界面 HMI 监控画面的同步程序三部分组成。第一部分 MAIN 主程序主要为 PLC 自带的 PID 工艺模块程序、Fuzzy 模糊算法程序以及查表程序等;第二部分中断程序实现温度采样的功能;第三部分 HMI 的时间同步程序主要是为了实验排查故障,完成该系统选用 HMI 第一次上电后 HMI 与 PLC 的时间同步的功能。图 5 为加热炉炉温模糊 PID 控制流程图,表 1 为 Fuzzy 程序中 DB1 数据块的变量表。

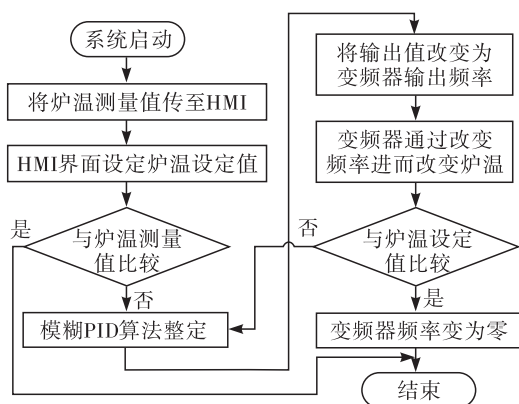


图 5 加热炉炉温模糊 PID 控制流程图

表 4 DB1 数据块的 Fuzzy 变量表

名称	数据类型	注释
$U_p$	Real	比例输出值
$U_i$	Real	积分输出值
$U_d$	Real	微分输出值
$K_{e1}$	Real	误差里化因子 1
$K_{e2}$	Real	误差里化因子 2
$K_{ec1}$	Real	误差变化率量化因子 1
$K_{ec2}$	Real	误差变化率量化因子 2
$K_p$	Real	输出增量比例因子
$K_i$	Real	输出增量积分因子
$K_d$	Real	输出增量微分因子
$e_1$	Real	第 $n$ 次误差
$e_2$	Real	第 $n+1$ 次误差
$e_3$	Real	
$ec$	Real	误差变化率
$EN$	DInt	误差变化值
$ECn$	DInt	误差变化率量化值
$UK_p$	Real	输出比例增量
$UK_i$	Real	输出积分增量
$UK_d$	Real	输出微分增量
误差累加值	Real	
PID 输出值 1	Real	
PID 输出值 2	Real	

人机界面 HMI 选用西门子 Smart 700 IEV3,在 WinCC flexible SMART V4 环境下完成本地上位机监控画面搭建,共三个界面,分别为操作主界面、报警界面、历史温度界面。见图 6<sup>[14]</sup>。

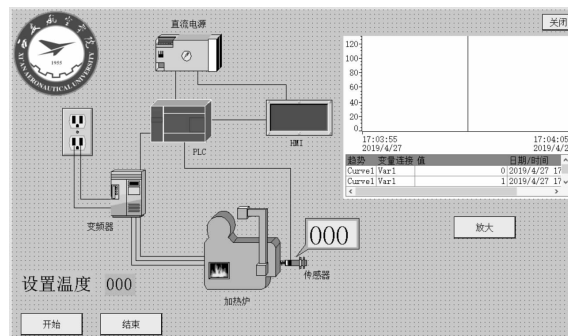


图 6 HMI 监控操作画面

(1)操作主界面:由 HMI、PLC 及拓展模块、变频器、实验加热炉、直流电源和传感器等元器件构成。实时显示界面上元器件的运行状态、设定温度和当前温度值,监控系统启动后生成的实时温度曲线。

(2)报警界面:监控系统的当前温度大于等于设定温度时的报警显示。

(3)历史温度界面:系统启动后工作状态生成的历史温度曲线;在 HMI 的 USB 接口插入 U 盘,系统会自动在 U 盘内创建\USB\_X60.1\路径,并在该路径下生成关于历史温度数据的 txt 文本。

### 2.4 HMI 与 PLC 及 PC 通讯

#### 2.4.1 HMI 与 PLC 通讯

选择 HMI 接口为以太网,地址为 192.168.1.200,访问点为“S7ONLINE”,PLC 地址设置为 192.168.1.10。连接 HMI 与 PLC 多功能交换机的以太网端口,实现在 HMI 上监控 PLC。需要注意的是,HMI 与 PLC 的地址不能相同。

#### 2.4.2 变频器与 PLC 通讯

通讯板 CB1241 实现变频器与 PLC 通讯。CB1241 通讯板是直插在 PLC 正面的扩展通讯模块,此处 PLC 通过该板进行 Modbus 通讯。在 PLC 编程时,需添加 CB1241 通讯板才可使用。首先点击项目树下 PLC 项目的设备组态,然后点击控制器→“SIMATIC S7-1200”→“通讯板”→“点对点”→“CB1241(RS485)”即可。

#### 2.4.3 HMI 与 PC 通讯

HMI 与 PC 以太网通讯。通讯前,需要设置上位机 PC 和 HMI 的 IP 地址为相同网段。首先点击 HMI 主屏幕的 Control Panel 按钮,选择 Transfer 选

项,打开 Enable Channel 选项和 Remote Control 选项, HMI 将组态运行时数据传至 PC。然后按下 Advanced 按钮,打开以太网参数设置,选择 Specify an IP address,在 IP Address 菜单下输入 PC 的 IP 地址为 192.168.1.245;子网掩码为 255.255.255.0 即可。

### 3 试验测试

基于 PLC 的模糊 PID 加热炉炉温实验控制系统如图 7 所示。

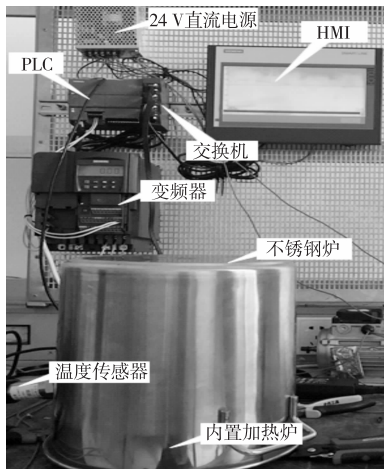


图 7 加热炉炉温控制实验台

首先给搭建好的炉温系统实验装置上电,将 PLC、触摸屏电源线接至 24 V 直流电源;变频器接至交流 220 V 电源;由以太网通讯线装载程序至 S7-1200PLC,将 TIA Portal V15.1 编程软件转至在线,手动将监控系统中的启动按钮置接通,观察 PLC 运行情况;在 HMI 中输入设定的加热炉炉温温度 80 °C,点击开始按钮,观察加热炉实时温度变化、PLC 控制程序中温度的模拟量输出数据的变化、变频器频率变化、炉温变化以及加热炉炉温的变化曲线,以此判断数据是否通过多功能交换机和通信板进行传输。HMI 的加热炉实时温度曲线见图 8。

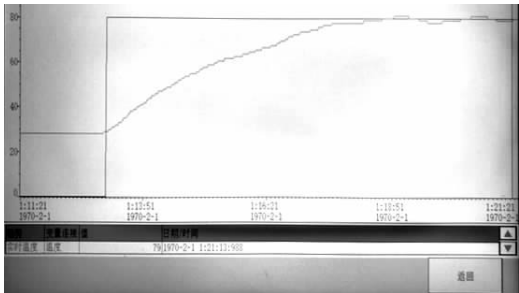


图 8 HMI 加热炉实时温度曲线

图 8 的实验结果表明,HMI 中温度设定值为 80 °C,当加热炉开始加温,温度迅速上升,在上升阶段,无震荡、无超调;约 5 秒后进入稳态状态,然后温

度最终在 80 ~ 81 °C 之间徘徊,稳态性能指标误差在 1% 范围变化,符合控制要求。

### 4 结束语

该文针对炉温控制系统非线性、大惯性延迟、时变性的特点,提出了 Fuzzy - PID Controller 控制策略,设计了 PLC 等硬件实现该算法的流程图,在上位机的 MATLAB 环境下,将 Fuzzy - PID Controller 的仿真模型在 SIMULINK 工具箱下搭建并验证,在同样输入条件下,传统 PID Controller 和 Fuzzy - PID Controller 输出响应曲线的动态性能指标相比,后者都有所下降,尤其超调量减小,系统可更快进入稳态。

实验实现中,人机界面 HMI 选用 SIMATIC Smart 1000 IEV3,作为远程主站,在 WinCC flexible SMART V4 环境下控制 PLC;主控器选用 SIMATIC 1214C DC/DC/DC PLC,在 TIA Portal V15.1 环境下,通过编写控制程序、通信模块 CM1241 和多功能交换机,接受操作员在 HMI 上下发的命令,并完成数据的传输,同时控制变频器 SIEMENS MM440,调整频率进而调整加热炉到设定温度,实验结果表明,模糊 PID 补偿器的加热炉炉温控制系统,PLC 控制升温状态无震荡、无超调,5 秒进入稳态,其稳态误差在 1% 范围变化,控制策略正确有效实现加热炉炉温的稳、准、快的控制目标。

#### 参考文献:

- [1] 黄广国,刘浩. 基于模糊决策算法的室内空调温度远程优化控制系统设计[J]. 自动化与仪表,2023(09):165-168+173.
- [2] 戚英杰,李雪林,孙玉坤. 基于模糊算法的回流焊温度系统仿真设计[J]. 控制工程,2022,29(09):1613-1618.
- [3] 杨云鹏,于有生,路向阳. 基于模糊 PID 的纺织厂空调温度控制系统设计[J]. 毛纺科技,2021,49(02):79-82.
- [4] 刘欢,戴文,洪健. 基于 PLC 的降温服局部热传递温度控制方法[J]. 自动化技术与应用,2023,42(03):50-54.
- [5] 范蟠果,刘经纬,王超然,等. 基于 PLC 的模糊 PID 冷却液温度控制系统的设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2020(01):69-72.
- [6] 王晓瑜,赵军峰. 基于模糊 PID 双电机同步控制的 PLC 设计与实现[J]. 现代制造工程,2020(10):128-133.
- [7] 贺永森,陈江. 模糊算法补偿温度变化对液压机压力的影响[J]. 锻压装备与制造技术,2022,57(06):110-113.

(下转第 48 页)

