

工业电加热器模糊 PID 温控系统设计

赵 红

重庆川仪十七厂有限公司 重庆 400707

【摘要】：工业电加热器存在非线性、大滞后、参数时变的特点，常规 PID 控制器固定参数模式不能适应复杂的工况温度调节要求，容易造成超调量大、稳态误差偏高、抗干扰能力差等现象。为了改善电加热器的温控效果，本文把模糊控制和传统的 PID 控制结合起来，设计出自适应模糊 PID 温控系统。利用机理分析法完成电加热器的数学建模，完成模糊控制器结构设计、模糊规则的确定以及参数解模糊运算，用 MATLAB 仿真平台比较常规 PID 和模糊 PID 控制性能，搭建小型硬件实验平台来验证系统的实用性。仿真和实验结果表明，所设计的模糊 PID 控制系统调节时间比传统的控制方法缩短了 40% 以上，温度超调量控制在 2% 以内，稳态误差小于 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，比传统的控制方法综合控制性能更好，可以满足化工、制造、热处理等行业高精度温控作业的要求。

【关键词】：工业电加热器；温度控制；模糊 PID；参数自整定；系统仿真

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.017

1 电加热器温控系统总体方案

本文所设计的模糊 PID 温控系统分为硬件层和软件层两大部分。硬件层由主控控制器、铂电阻温度采集单元、晶闸管功率调节单元、电加热组件和人机交互模块组成。软件层以模糊 PID 控制算法为主，加数据滤波程序、参数整定程序、故障报警程序。系统运行流程为操作人员输入目标温度值，温度采集模块定时采集加热器的实时温度，经过数字滤波后传送给主控单元。主控单元根据温度偏差和偏差变化率来计算出 PID 比例系数、积分系数、微分系数，并将这两类参数输入到模糊控制器中，经过模糊推理、规则匹配、解模糊运算之后，得到 PID 控制器的控制信号，从而调节晶闸管的导通占空比，进而改变加热功率，达到温度闭环动态调节的目的。

2 电加热器数学模型建立

根据工业电加热器温控系统的特性，可以将其近似地看作是 第一阶惯性加纯滞后模型，该模型可以很好地描述大部分中小型工业电加热设备的动态特性，其传递函数表达式为

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

公式中参数含义为，K 是系统静态放大系数，体现加热功率与温度的关系，T 是系统惯性时间常数，体现腔体的热惯性， τ 是纯滞后时间常数，体现温度采集和热量传递的滞后时间。

通过阶跃响应实验进行参数辨识，实验时将初始室温设为 25°C ，给加热器施加一个固定的阶跃加热信号，记录温度实时变化的数据，最后得到本文研究的电加热器模型参数，对应的传递函数为

$$G(s) = \frac{12.6}{215s + 1} e^{-18s}$$

该模型可以直观地反映出设备大滞后、大惯性运行的特点，在之后的仿真实验中都用这个模型做为被控对象来检验控制算法的性能。

3 模糊 PID 控制器设计

3.1 常规 PID 控制缺陷分析

常规 PID 控制器的输出量是由比例环节、积分环节和微分环节三部分组成的，控制算法的基本公式为

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}]$$

式中 $u(t)$ 是控制器输出信号， $e(t)$ 是温度设定值和实际反馈值之间的差， K_p 是比例系数， T_i 是积分时间常数， T_d 是微分时间常数。常规 PID 控制器运行过程中 K_p 、 T_i 、 T_d 三项参数一旦整定就固定不变，不能适应电加热器全工况运行的要求。升温阶段固定参数容易出现超调，恒温阶段不能消除外界干扰造成的温度波动，滞后特性存在时积分环节容易产生积分饱和问题，延长系统调节时间，因此需要采用智能化参数整定方案来改善控制效果。

3.2 模糊 PID 控制原理

模糊 PID 控制把温度偏差和偏差变化率当作输入变量，依靠事先设定好的模糊控制规则，利用模糊推理逻辑来实时调节 PID 三项主要参数，从而达到参数自适应整定的目的。系统运行过程中如果偏差大，则控制器先增大比例系数提高响应速度，削弱积分微分的作用以避免超调，偏差小时，三者互相配合，平衡响应速度和控制稳定性，偏差小时，加大积分和微分的力度，消除稳态误差，抑制微小的温度波动。

3.3 模糊控制器详细设计

3.3.1 输入输出变量确定

本次设计将温度偏差 E、偏差变化率 EC 作为模糊控制器的两个输入变量，PID 参数修正量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 作为输出变量。根据工业温控的实际工况来确定输入输出变量的基本论域。温度偏差基本论域设为 -10°C 到 10°C ，偏差变化率基本论域设为 -2°C/s 到 2°C/s 。把输入输出变量模糊化成 7 个模糊子集，

分别为负大、负中、负小、零、正小、正中、正大，用英文缩写表示为 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB。变量量化等级设为-3 到 3，使用更加灵敏的三角形隶属度函数，降低模糊运算的复杂度，保证系统实时性。

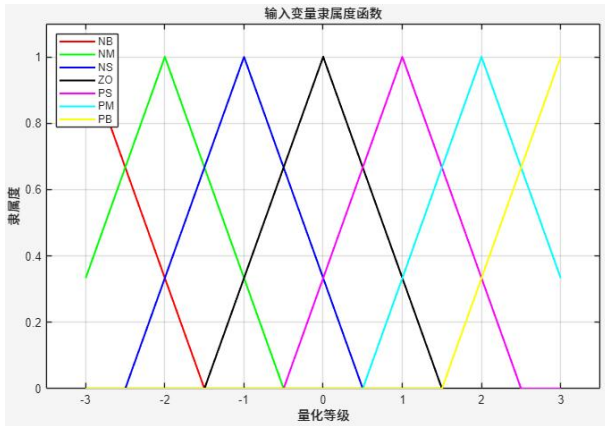


图 1 量化等级分布

3.3.2 模糊控制规则制定

根据电加热器温控实操经验以及 PID 参数调节规律，制定出适合本系统使用的模糊控制规则。温度偏差绝对值太大时，增大比例修正系数，迅速缩小温度偏差，减小积分修正系数防止积分饱和；温度偏差处在中等区间时，适当地改变比例和微分参数来抑制温度超调；温度偏差极小时，加大积分参数的比重，完全消除稳态误差。用 ΔK_p 对应的模糊控制规则如表所示。

表 1 ΔK_p 模糊控制规则表

EVEC	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

3.3.3 解模糊运算

模糊推理得到的参数修正量为模糊集合，不能直接用作 PID 控制器调节，必须经过模糊运算得到精确数值。本文采用重心法进行解模糊处理，运算精度高、输出曲线平滑，适合于温控系统参数调节。经过解模糊之后，根据初始整定参数就可

以得到实时最优 PID 参数，计算公式为

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases}$$

式中 K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 为初始整定 PID 参数， ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为模糊控制器输出修正量。

4 系统仿真与结果分析

4.1 仿真模型搭建

为了检验模糊 PID 算法的控制性能，用 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建常规 PID 控制系统和模糊 PID 控制系统仿真模型。模型主要是由给定模块、模糊 PID 控制模块、被控对象模块、数据显示模块组成。结合工程试凑法，整定初始 PID 基础参数， K_p 取值 2.8， K_i 取值 0.015， K_d 取值 1.6。设置仿真目标温度为 100℃，仿真总时长为 1000s，采样周期为 1s。

4.2 仿真结果对比分析

仿真结束后，采集两类控制系统时域性能指标，主要包括超调量、上升时间、调节时间、稳态误差等，具体数据见下表。

表 2 两种控制算法性能指标对比

控制算法	超调量/%	上升时间/s	调节时间/s	稳态误差/℃
常规 PID	7.86	206	485	±1.25
模糊 PID	1.92	112	276	±0.42

根据数据和响应曲线可以得到如下结论，在相同的仿真工况下，模糊 PID 控制系统上升时间缩短了 45%以上，系统响应速度明显提高；超调量由原来的 7.86%降低到现在的 1.92%，有效地避免了由于温度超调造成的报废产品问题；调节时间缩短了 43%，系统收敛速度加快了；稳态误差控制在 ±0.42℃ 以内，控制精度比常规 PID 要高得多。为了检验系统的抗干扰性，在仿真运行了 500s 之后，给系统加上了 -15℃ 的瞬时温度扰动。扰动作用下常规 PID 系统最大温度偏差为 6.2℃，耗时 120s 恢复到稳态；模糊 PID 系统最大温度偏差为 2.1℃，恢复稳态的时间为 45s，抗干扰性、动态恢复性好。

5 系统软硬件实现

5.1 硬件系统设计

硬件系统采用 STM32F103 为主控芯片，配合 PT100 铂电阻温度采集电路、晶闸管功率驱动电路、声光报警电路、液晶显示电路等组成。温度采集模块加装二阶 RC 滤波电路，减小工业现场电磁干扰对采集信号的影响，功率调节模块用双向晶闸管结构，用脉冲宽度调制信号调节加热功率，适合 20kW 以下的中小型工业电加热器。所有的硬件模块都是采用工业级标准的，在工作温度上可以达到 -10℃ 到 60℃ 的范围，可以适应

复杂的现场运行环境。核心硬件选择参数见表3。

表3 系统核心硬件选型参数表

硬件器件	型号规格	性能参数	功能用途
主控芯片	STM32F103C8T6	72MHz 主频, 64KB 闪存	数据运算、算法执行、设备调度
温度传感器	PT100	测温范围-20°C~600°C, 精度 0.1°C	实时采集加热器腔体温度
双向晶闸管	BTA41-600B	额定电流 41A, 耐压 600V	调节电加热器加热功率
显示模块	LCD1602	2 行 16 字符, 电压 5V	展示设定温度与实时温度
报警模块	有源蜂鸣器	工作电压 3.3V~5V	超温、故障声光预警

5.2 软件系统设计

软件程序使用模块化编程思想, 主要分为主程序、温度采集滤波子程序、模糊 PID 参数整定子程序、功率调节子程序、故障报警子程序。主程序完成系统初始化和任务调度, 每 1s 完成一次温度采集和参数更新; 模糊 PID 子程序自带完整的模糊规则库, 用离线查表加在线修正的方式减小主控芯片的运算负担, 提高程序的执行速度。另外增加超温保护逻辑, 实时检测腔体温度, 温度超过安全范围时立即断开加热电源并发出声光报警信号。

5.3 实物实验验证

搭建小型实验平台, 用 10kW 工业电加热器做实物试验, 分别设置 80°C、150°C、200°C 三个目标温度, 记录稳态阶段温度波动数据。从实验结果可知, 在常规的 PID 控制模式下三组温度稳态误差都大于 1°C, 而模糊 PID 控制模式下的稳态误差

全部小于 0.5°C, 升温过程中没有明显的超调, 恒温过程中温度波动比较平稳, 和仿真实验的结果是一致的, 具有一定的工程应用价值。

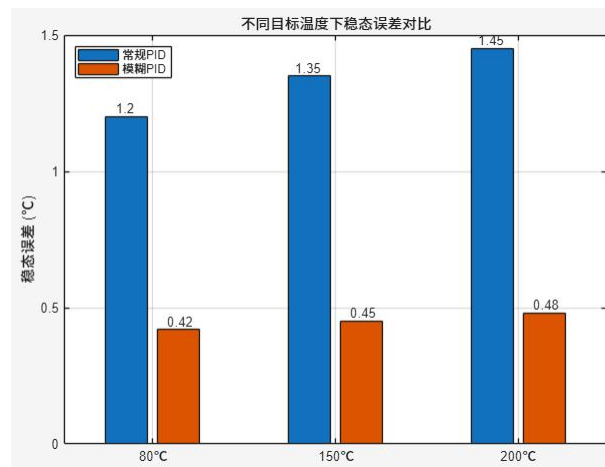


图2 稳态误差对比

6 结论

本文针对工业电加热器温控系统非线性、大滞后、参数时变的控制难点, 设计模糊自适应 PID 温控系统。采用机理辨识法建立被控对象的数学模型, 确定模糊控制器的输入输出变量、隶属度函数和控制规则, 完成 PID 参数在线动态整定。从仿真和实物实验结果可以看出, 本设计的模糊 PID 控制相比于传统的固定参数 PID 控制, 在响应速度、控制精度、抗干扰能力三个方面都得到了很大的改善, 可以很好地解决传统温控方案超调量大、稳态误差大、抗干扰能力差等问题。该控制系统结构简单、硬件改造成本低、算法移植性强, 不需要对现有的加热设备主体结构进行改造, 只需要对控制程序和配套电路进行升级就可以完成改造, 适合大部分中小型工业电加热设备。后续可以对极端高低温工况进行优化, 用自适应学习算法来扩大系统适用范围, 给工业电热设备智能化温控升级提供低成本、高可行性的技术方案。

参考文献:

- [1] 李玲琴.玉米设施种植智能温控系统设计及温光协同光合效率提升路径研究[J].数字农业与智能农机,2026,(4):39-41.
- [2] 田树炜,石峰伟,王懿,等.乙二醇气体传感器恒温控制系统设计与实现[J/OL].延安大学学报(自然科学版),1-6[2026-06-01].https://doi.org/10.13876/J.cnki.ydnse.250116.
- [3] 汪世康,金梓惠,许庭瑞,等.基于 STM32F103 单片机的智能家居温控系统设计[J].物联网技术,2026,16(7):117-120+124.
- [4] 刘坤.基于物联网的冰箱智能温控系统设计[J].轻工标准与质量,2026,(2):34-36.
- [5] 王发香,闫世风,柏雨润,等.日光温室水循环温控系统设计与夏季降温性能分析[J].农业工程学报,2026,42(2):237-245.