

# 基于模糊PID的温度控制系统研究进展

王少坤, 李伟, 童俊

(佛山科学技术学院机电工程与自动化学院, 广东 佛山 528000)

**摘要:** 综述模糊PID对温度控制的应用研究进展, 针对模糊PID控制的不足, 提出改进方法。现代控制技术已经全面向智能化发展, 智能化理论与PID结合在智能控制方面有着良好的效果。以温度控制为例, 在食品生产、高分子材料加工等工业生产过程中温度控制是一个重要环节, 而对于温度控制建立精确的数学模型比较困难。模糊PID控制精度高而且控制精度不太依赖于模型的精度, 还有鲁棒性好等优点, 利用模糊PID进行温度控制能够提高温控精度, 减小温度波动。利用优化算法或对模糊PID控制环节进行优化, 可以更好地满足各种各样的温度控制需求。

**关键词:** 模糊PID控制; PID控制; 温度控制系统; 优化算法

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)01-0001-04

## Application Progress of Fuzzy PID Temperature Control

WANG Shao-kun, LI Wei, TONG Jun

(College of Mechanical and Electrical Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528000 China)

**Abstract:** The application of fuzzy PID to temperature control is reviewed, and the improvement method is put forward for the deficiency of fuzzy PID control. Modern control technology is fully intelligent development, intelligent theory and PID combined in intelligent control has a good effect. Taking temperature control as an example, temperature control is an important link in the industrial production process such as food production and polymer material processing, but it is difficult to establish an accurate mathematical model for temperature control. Fuzzy PID control has high control precision and control precision does not depend on the precision of the model, and has the advantages of good robustness, using fuzzy PID temperature control can improve the precision of temperature control, reduce temperature fluctuation. Using optimization algorithm or optimizing fuzzy PID control link can better meet various temperature control requirements.

**Keywords:** fuzzy PID control; PID control; temperature control system; optimization algorithm

### 0 引言

PID控制理论发展已久, 如今还是工业上运用最广泛的控制算法。PID控制中包含了比例环节( $K_p$ )、积分环节( $K_i$ )、微分环节( $K_d$ )三个控制参数, 使用起来相对简便。控制流程如图1所示, 主要控制方法就是通过调节 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 三个参数对系统进行控制。常规PID控制时参数一旦确定难以更改和调整, 导致控制精度低, 控制过程中面对干扰调节能力差, 鲁棒性差。现代工业对控制精度的要求越来越高, 并且工业生产一直在朝着自动化、智能化的方向不断地发展, 单纯的PID控制已经无法满足现在的工业控制需求, 所以许多智能控制算法被结合到PID控制过程中, 例如模糊理论、专家控制、神经网络等。智能算法的加入能够大大地提高PID的控制性能, 对被控对象的控制更加稳定, 在控制过程中也能更好地对出现

的干扰和被控对象突然的变化做出快速的反应, 实现对PID控制参数的智能化调整。

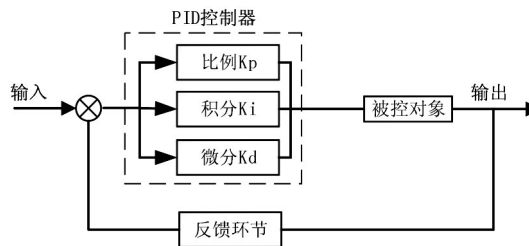


图1 常规PID控制框图

工业生产过程中温度常常是一个影响生产的重要因素, 在生产过程中温度的变化往往呈现出非线性、滞后性、大惯性等特点, 而对这样的非线性复杂系统进行精确的建模是比较困难的。传统PID控制对模型的精确程度要求较高, 所以在对温度控制要求较高的生产工艺中单纯地运用常规PID对温度进行控制难以满足生产需求。模糊控制及其相关定理在1973年由美国Zadeh教授提出, 之后随着对模糊控制理论的研究逐渐深入, 模糊控制

\*基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金项目(2020 A1515110461)

收稿日期: 2023-10-09

的应用场景也开始迅速增多。将模糊控制理论与PID结合进行控制是模糊控制的发展分支之一,现在越来越多地应用到各种工业生产过程中。

## 1 模糊PID控制对温度的控制进展

PID控制算法是一个闭环的负反馈控制,通过将采样到的偏差值与期望值比较,反馈给控制器调整输出减小误差。模糊控制理论基于模糊数学的思想和理论发展而来,利用积累的控制经验来制定控制规则。温度控制过程的数学模型难以确定,而利用模糊控制只需要大致地掌握系统温度的变化趋势就能够达到良好的控制效果。

模糊控制的基本流程:首先,将输入值模糊化,再利用模糊规则进行模糊推理,最后解模糊化。将模糊理论应用到PID的控制过程当中,实现对 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 的智能调整,模糊PID的基本控制原理如图2所示。

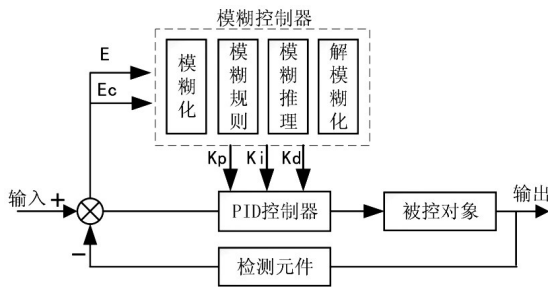


图2 模糊PID控制框图

模糊控制器的输入一般为误差( $E$ )以及误差变化率( $E_c$ ),将 $E$ 、 $E_c$ 输入到模糊控制器中通过隶属度函数和模糊规则进行模糊推理,隶属度函数的类型有三角型、高斯型等常用函数,模糊规则主要来源于专家经验或工程操作的经验。模糊推理完成输出一个模糊量,通过重心法、面积法等进行解模糊得到一个清晰值输出给执行器。解模糊的关键在于解决 $E$ 和 $E_c$ 等级量化梯形图程序设计及查表获取模糊控制变量的梯形图程序设计<sup>[1]</sup>。整个控制过程中模糊控制器会不断地调节 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 的值。

模糊PID控制温度时,前期温差较大模糊控制的部分改善了升温速度,而当温度趋于稳定时PID的控制能将稳态误差控制得更好。对比传统PID控制,模糊PID控制具有响应速度快、抗干扰性强和设计简单的优势<sup>[2]</sup>。

模糊PID温度控制系统被应用到食品加工、工业材料加工、供热控制等生产生活当中<sup>[3-10]</sup>。张胜生等<sup>[3]</sup>设计了模糊PID控制系统,实现平板硫化机的温度自适应控制。经过分析系统仿真曲线,模糊PID控制器恒温控制效果良好,超调量和稳态误差都优于传统PID控制。郝朝会等<sup>[4]</sup>设计了自适应模糊PID控制器,提高了对茶叶杀青机温度的控制精度和温度控制系统的稳定性。温度和时间是茶叶杀青过程中的关键影响因素,通过MATLAB

仿真对比,在恒定温度设置为 $75^{\circ}\text{C}$ 的情况下,自适应模糊PID控制时,系统的超调量和稳态误差为0,控制效果对比传统PID控制提升明显,调节时间更短,控制精度高稳定性强,提高了杀青效率,保证了茶叶的质量。郝文彬等<sup>[5]</sup>设计了汽车烘干房的温度控制系统。对于汽车烘干房面积大,热量分布难以平均的问题。先优化烘干房内结构,再通过模糊理论优化 $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 三个控制参数,设计模糊PID控制系统,并对系统进行仿真。相对于传统PID控制,模糊PID控制对烘干房的温度控制效果更好,温度波动更小,受外界干扰时调节时间更快。韦宏利等<sup>[6]</sup>针对小型生化实验室中温育盘的恒温控制,设计了一套集温度采样、加热并以模糊PID为控制策略的温度智能控制系统。利用模糊PID控制提供高精度、稳定性好的智能控制来满足生化实验中的恒温要求,并实时进行自我调整,帮助小型生化实验室提高实验准确性和工作效率。通过对加入模糊PID控制的温育盘系统进行仿真,得出相对于传统PID加入了模糊控制使系统的受到扰动恢复时间减少了 $2.6\text{ s}$ ,温育盘的最低温度提高了 $0.4^{\circ}\text{C}$ 。于海丽等<sup>[7]</sup>基于模糊PID设计了智能控制等温锻造压机锻造温度的温度控制系统。分析了等温锻造工艺过程的温度控制需求,对温度控制系统的核心硬件和整体构架进行了设计。仿真实验显示,以模糊PID进行控制的温度控制曲线更接近标定的曲线,证明了模糊PID温度控制能够对锻造过程加热工艺温度进行较高精度的控制,提高了等温锻造产品的良品率。雷翔霄等<sup>[8]</sup>针对电镀工艺中的镀液温度要求,建立镀液数学模型,设计了自适应模糊PID算法。根据电镀槽液的变化规律制定了模糊控制规则,在仿真实验中验证了其良好的跟踪能力、稳态性能、鲁棒性、动态特征。经过实际测试验证系统超调量小于3%,稳定时误差小于 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

因为茶叶烘焙温度对茶叶品质有重要影响,因此高育森等<sup>[9]</sup>设计了智能木炭烘焙机。控制系统采用模糊PID控制,在实际试验中对比电烘焙,模糊PID控制时温度控制稳定,误差为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。烘焙出的茶叶产品质量更优。曾柄杰等<sup>[10]</sup>利用模糊PID控制算法对葡萄酒窖进行智能控温。酒窖的温度是葡萄酒发酵的重要因素,针对酒窖温度的变化规律,设计了模糊控制规则,并以重心法作为解模糊的方法。经过仿真工具Simulink的仿真分析,模糊PID能够良好地实现对酒窖温度的自适应控制,系统的抗干扰性能强,运行稳定。

## 2 模糊PID温度控制的优化设计

模糊控制是将专家的手动控制策略进行语言归纳,由此建立模糊规则表。这使得模糊控制在制定模糊规则时非常依赖于专家的控制经验。过分依赖于专家经验,

在一些情况下反而会受经验的限制,达不到最好的控制效果。基于模糊PID控制结合专家控制知识库、神经网络等智能算法优化模糊控制器。例如引入专家知识库能够利用专家经验对模糊系统的输出进行优化。利用变论域的优化方法对模糊控制器的输入与输出进行伸缩处理,能够实现参数自整定和控制规则的自调整。通过对模糊控制器的优化,能够进一步提升控制系统性能,更好地满足不同的温度控制需求。

滕琦等<sup>[11]</sup>在模糊PID的控制基础上加入专家系统,对制药生产过程中浓缩工艺的温度进行自整定控制。引入专家知识库控制器,实现对模糊控制输出的量化因子进行在线优化,使得控制过程更贴近人类控制,提高系统的抗干扰能力。对浓缩工艺中蒸发室温度进行建模,通过仿真对比得出模糊PID控制调节时间短、超调量小、稳定快。实际生产实验中,在加入专家系统的模糊PID控制下最大温差为0.8℃,对比模糊PID,传统PID控制精度大幅提升。张堂玉等<sup>[12]</sup>根据果酒的发酵要求,引入了正反切函数和Smith预估,优化设计了模糊PID控制。验证了利用反正切函数进行限幅,优化系统的调节时间与稳态精度的可行性。利用Smith预估对系统非线性延时进行补偿及消除。通过仿真得出结论,限幅模糊PID相对于模糊PID调节时间更快。

陈明霞等<sup>[13]</sup>针对橡胶挤出机的温度控制系统进行研究,在模糊PID的控制基础上引入了Smith预估和遗忘因子递推最小二乘法(FFRLS),FFRLS辨识算法能够根据实时的数据在线辨识Smith预估器模型。通过仿真对比实验,经过FFRLS的辨识优化,Smith预估器的滞后补偿更加精准,Smith预估器的模型更加接近真实模型。对比优化前的模糊PID控制系统,在有动态干扰的情况下,控制系统的延迟矫正能力更强,鲁棒性和控制精度也都得到了提升。

刘尘尘<sup>[14]</sup>基于ARM设计一款自适应温度控制系统,该系统将神经网络与Smith预估补偿结合到模糊PID之中。神经网络算法实现PID的自适应控制,利用模糊控制理论对Smith预估进行处理,可以加强系统的调节性能。经过与常规PID和模糊PID的仿真结果对比,该系统收敛速度更快,系统稳定性、控制精度都有进一步的提高。

许丽等<sup>[15]</sup>利用BP神经网络算法优化系统误差均方值与模糊控制算法结合,推导了模糊神经网络温度控制算法,实现对PID控制参数的智能寻优。将这个�方法应用到现代发电厂锅炉的温度控制系统之中。现代电厂锅炉负荷大,为了保证锅炉的安全运行,温度控制系统需要有处理非线性变量的能力,需要对运行过程中的随机变量进行快速调整。经过仿真验证和实测分析,论证了模糊神经PID在温度控制过程中调节时间更短、超调量更小,

并能在不同工作阶段智能控制和调整温度。

变论域模糊PID控制有较强的控制容错能力,在控制的误差越来越小时,对论域进行缩小能够更好地提高控制精度。同理,在误差变大时对论域进行扩大处理。变论域的方法通过设计伸缩因子,这样能够在不过多地依赖于专家经验的情况下自动调节模糊规则,实现良好的智能控制<sup>[16-18]</sup>。高淑芝等<sup>[16]</sup>研究了聚氯乙烯汽提塔生产过程中的温度控制精度的问题。引入变论域的方法设计了模糊PID控制器,与常规PID算法和模糊PID控制算法做了对比,研究表明,变论域模糊PID控制性能更好,跟踪性能提升有效减弱了温度控制过程中滞后性的影响。郑睿等<sup>[17]</sup>通过检测在变论域模糊PID、模糊PID和常规PID分别控制下所生产的产品力学性能,结果表明,变论域模糊PID温度控制下产品合格率明显优于其他两种控制。温玉春等<sup>[18]</sup>设计了变论域的模糊PID自适应控制器对包装机的热封切刀的温度进行控制。引入伸缩因子调整模糊控制器输入中的量化因子和输出中的比例因子。采用Mamdani的最小最大推理方法,加权平均得到最后的清晰值。通过仿真和实测的结果分析,模糊PID控制明显优于传统PID控制,调节时间缩短了28s,超调量仅1.8%。实际的温差范围在-1.5℃~+1.5℃之间。

粒子群优化算法能通过迭代计算寻找最优解,利用粒子群算法对模糊PID控制中的权重因子进行寻优,能够更好地发挥模糊PID的控制效果。李雪吉等<sup>[19]</sup>通过粒子群优化算法对模糊PID控制进行智能优化。粒子群算法利用迭代寻优的方法,找到最接近的预设适应值所对应的权重因子,最优权重因子能够进一步提高系统的响应速度。经过MATLAB的仿真对比,经过粒子群优化的模糊PID控制器响应时间更快而且超调量也更小。刘凯伟等<sup>[20]</sup>提出利用混沌粒子群优化算法优化模糊PID控制器的控制参数,应用于对木塑挤出机的温度控制。混沌粒子群算法相对标准粒子群算法,求解最优解的效率更高、质量更好。混沌粒子群优化了模糊PID控制的调整时间和自适应能力。仿真对比混沌粒子群模糊PID、模糊PID和常规PID控制曲线,混沌粒子群响应时间快,超调量很小,面对干扰调整迅速。

郭福雁等<sup>[21]</sup>对锅炉的温度控制系统进行分析,利用模糊PID控制器进行控制。为了让模糊PID控制系统能够实现误差的校正,得到更精确的参数,引入动态矩阵算法。将动态矩阵算法加入反馈环节,建立预测模型,通过对现在和过去的误差分析计算预测未来的输入与偏差。仿真结果显示,在模糊PID控制时超调量5.3%、上升时间260s、稳定时间620s,而加入动态矩阵后系统超调量仅为0.15%,上升时间为230s、稳定时间400s,动态矩阵模糊PID的控制性能提升明显。

魏小宇等<sup>[22]</sup>为了加强温度控制系统对反应釜温度控制的跟随性,在常规PID控制基础上,加入比例设定值权重,提升系统抗干扰性能和跟随性,再利用模糊控制自动调整加权值的比例系数提高系统适应性。反馈通道引入了灰色预测实现超前控制改善控制器的滞后问题。实际测试中与常规PID控制对比,控制效果提升明显,模糊加权PID跟随性能好、反应速度更快、超调量更小、系统更稳定。

吴勇等<sup>[23]</sup>针对颗粒饲料加工过程中的温度控制问题,设计了模糊免疫PID控制系统。模糊免疫PID控制器先利用免疫算法替代控制参数 $K_p$ 实现控制器的自适应输出。然后再利用模糊控制理论对免疫PID控制器进行优化,经过与模糊PID进行仿真对比,模糊免疫PID控制响应速度更快、超调量更小,并且有更好的控制稳定性。

黄斌等<sup>[24]</sup>将模糊PID与传统PID结合,设计了加热炉温度控制系统。控制过程中温差过大时利用模糊PID快速响应,节省系统调整时间。当误差变小到一定的范围内后,切换为传统PID控制保证系统控制精度。实际应用中,对比混合型模糊PID和传统PID,结果显示,混合型模糊PID控制下温度波动更小,调节时间也得到了大幅度减小,对加热炉炉温的控制精度更高,不仅提升了产品质量又达到了降低能耗的效果。

### 3 结束语

温度对于许多工业生产是重要的影响因素,对温度的控制精度不仅会直接影响产品的质量,还会影响设备的生产效率、能耗和安全性等问题。模糊PID控制针对于工业中非线性复杂温度控制系统有着良好的控制效果,模糊控制逻辑的加入让PID控制变得更加智能、控制性能更好。而经过对模糊PID的深入研究和智能优化算法的蓬勃发展,将智能算法加入模糊PID控制当中去,优化模糊PID的控制性能也更好改善模糊PID控制的局限性,并拓展了它的应用范围。

#### 参考文献:

- [1] 蒋思中. 基于模糊PID算法的铝棒温度控制系统研究[J]. 科技通报, 2017, 33(10): 121-124.
- [2] 徐秀英. 模糊PID控制在塑料挤出机中的应用研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2021, 38(6): 75-78.
- [3] 张胜生, 胡丹, 宋春华. 模糊PID控制在硫化机温度控制中的应用[J]. 仪表技术与传感器, 2012(10): 73-75, 78.
- [4] 郝朝会, 孙传祝, 苏夏侃. 自适应模糊PID控制在茶叶杀青机中的应用[J]. 农机化研究, 2013, 35(2): 201-204.
- [5] 郝文彬, 冯天玉, 黄世明, 等. 基于模糊PID控制的烘干房温度控制设计[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(12): 101-106.
- [6] 韦宏利, 周建波, 王晴悦, 等. 基于模糊PID的温度控制系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(9): 111-116.

[7] 于海丽, 李智慧, 段广云. MSP430控制的等温锻造液压机温度控制系统设计[J]. 铸造技术, 2018, 39(1): 93-95.

[8] 雷翔霄, 唐春霞. 基于自适应模糊PID算法的镀液温度控制[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(8): 35-38.

[9] 高育森, 任金波, 李梅娟, 等. 基于模糊PID控制的茶叶炭焙烘焙机设计与试验[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 96-101.

[10] 曾柄杰, 许涛, 闫轩. 基于模糊PID的葡萄酒窖温度控制方法研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(18): 59-63.

[11] 滕琦, 刘庆阁. 基于自整定模糊PID算法的浓缩工艺温度控制研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2021, 44(2): 80-85.

[12] 张堂玉, 龙祖强. 基于限幅模糊PID算法的果酒温度控制系统[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(2): 19-21.

[13] 陈明霞, 周冬冬, 赵金迪. 基于FFRLS辨识优化橡胶挤出机Smith模糊PID温度控制系统[J/OL]. 机床与液压: 1-13[2022-07-01].

[14] 刘尘尘. 基于ARM的嵌入式自适应温度控制系统设计[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(4): 448-452.

[15] 许丽, 吴泽明, 刘旭, 等. 模糊神经网络锅炉温度控制系统[J]. 真空, 2021, 58(4): 77-80.

[16] 高淑芝, 高宪文, 朱志承. 基于变论域模糊PID的汽提塔温度控制方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(10): 1369-1372.

[17] 郑睿, 汪东芳. 双螺杆挤出机温度控制系统的设计与优化[J]. 合成树脂及塑料, 2016, 33(4): 55-59.

[18] 温玉春, 刘祺君. 基于模糊PID的包装机热封切刀温度控制[J]. 包装工程, 2017, 38(3): 109-113.

[19] 李雪吉, 程海鹰, 胡志勇, 等. 粒子群优化模糊PID在燃烧器温度控制中的应用[J]. 机械科学与技术, 2021, 40(2): 276-280.

[20] 刘凯伟, 唐文秀, 孙丽萍, 等. ACPSO优化模糊PID的木塑复合材料挤出机温度控制研究[J]. 林产工业, 2016, 43(12): 11-15, 42.

[21] 郭福雁, 郭蕊, 王心怡. 基于动态矩阵模糊PID算法的工业锅炉温度控制优化研究[J]. 天津城建大学学报, 2019, 25(4): 295-299.

[22] 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.

[23] 吴勇, 赵勇, 黄堃. 基于模糊免疫PID的饲料加工试验机温度控制研究[J]. 饲料工业, 2013, 34(11): 8-10.

[24] 黄斌, 谢国进, 梁武三, 等. 基于混合型模糊PID的加热炉温度控制系统应用[J]. 电气传动, 2018, 48(2): 43-46.

作者简介: 王少坤(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 智能控制系统。