

# 基于模糊PID的电气设备温度控制技术研究

陆开裕 王翊轩

广西右江水利开发有限责任公司 广西百色 533000

**摘要:** 本文着重探讨基于模糊PID的电气设备温度控制技术。首先阐述PID与模糊控制的理论基础,剖析二者融合的技术优势,构建含温度采集、模糊PID运算、执行调节的闭环控制系统。在硬件选型上,选用高精度铂电阻传感器与嵌入式控制器,软件层面设计模糊规则库与参数自整定算法。研究表明,模糊PID控制下设备温度超调量降低,调节时间缩短,在变负载与环境干扰工况下温度波动幅度较小。该技术可有效提升电气设备温度控制精度与稳定性,为设备安全运行提供保障,具有较高的工程应用价值。

**关键词:** 模糊PID; 电气设备; 温度控制

## 引言

新时期电气设备逐渐向着高功率、小型化方向发展,内部元件密集化很容易引发发热问题,温度过高易引发绝缘老化、参数漂移,甚至设备损毁,因此精准温度控制成为保障设备可靠性的关键。传统PID控制因参数固定,难以适应电气设备负载波动、环境变化等复杂工况,在非线性和大滞后的温度控制场景中效果受限。本文以优化电气设备温度控制性能为目标,深入研究模糊PID控制原理,设计集硬件选型、算法优化、系统集成于一体的控制方案,探究其在不同电气设备中的适配性与优越性,为相关领域温度控制技术升级提供理论与实践支撑。

## 一、模糊PID控制理论

### (一) PID控制基本原理

PID是基于比例(P)、积分(I)、微分(D)三个环节的协同作用实现的精准控制。比例环节依据偏差大小输出控制量,偏差越大调节作用越强,可快速响应系统变化,但单独使用易产生稳态误差;积分环节累计偏差量并持续调节,能有效消除稳态误差,却会延长调节时间并增大超调风险;微分环节根据偏差变化率提前预判系统趋势,抑制超调、加快响应速度,不过对噪声信号敏感。其数学表达式为:

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

**作者简介:** 陆开裕,1995年11月21日,男,壮族,广西壮族自治区百色市靖西市渠洋镇人,大学本科,主要研究方向:自动化。

其中 $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$ 分别为比例系数、积分时间常数、微分时间常数。传统PID在电气设备温度控制中因参数固定,面对负载波动、环境干扰等非线性工况时,难以兼顾响应速度与控制精度,适配性受限。

### (二) 模糊控制基本原理

模糊控制主要是基于模糊集合理论与模糊逻辑推理,期间无需建立被控对象精确数学模型,多适用于一些较为复杂的非线性系统。其核心流程包括模糊化、模糊推理与解模糊化,模糊化将温度偏差、偏差变化率等精确输入量转换为模糊量,通过隶属度函数(如三角形、梯形函数)量化模糊程度,实现精确量到模糊集合的映射。模糊推理以专家经验为基础构建规则库,采用if-then形式表述控制策略,例如“若温度偏差大且变化率小,则输出控制量大”,推理机依据输入模糊量匹配规则并得出模糊输出。解模糊化则将模糊输出量转换为精确控制量,常用重心法通过计算模糊集合重心获取最优值,兼顾控制平滑性与准确性,最大隶属度法虽运算简便,但易丢失信息,需根据场景选择。

### (三) 模糊PID控制的结合

模糊PID控制的有机融合其实就是通过模糊逻辑在线优化PID参数,提升系统适配性。其核心原理是将温度控制中的偏差(e)与偏差变化率(ec)作为模糊控制器输入,经模糊化处理后,依据规则库推理得出PID参数 $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$ 的修正量,实现参数实时调整:当偏差大时,增大 $K_p$ 、减小 $T_i$ 以加快响应;当偏差小时,减小 $K_p$ 、增大 $T_i$ 、调整 $T_d$ 以抑制超调。系统结构由模糊控制模块与PID控制模块组成,模糊模块含模糊化、规则库、推理机和解模糊化单元,完成参数修正计算;PID模块依

据修正后参数执行控制运算，输出调节信号至执行机构。二者形成闭环协作，既保留了PID控制精度，又可以通过模糊决策很好地应对复杂工况，有效解决了传统PID的参数固化问题。

## 二、电气设备温度控制系统设计

### (一) 系统总体架构

本文研究的电气设备温度控制系统采用闭环控制模式，即以“感知-决策-执行”为核心构建总体架构，框架主要由温度感知层、控制核心层、执行调节层及人机交互层组成。温度感知层负责实时采集电气设备关键部位温度信号，为系统提供输入依据；控制核心层搭载模糊PID算法，对采集信号进行运算处理并生成控制指令；执行调节层根据指令驱动执行机构实现温度调节；人机交互层通过触摸屏或上位机软件实现参数设置、状态监控与数据存储功能。

该系统的实际工作流程可归纳为以下几点：首先，温度传感器将设备温度转换为电信号，经信号处理模块调理后传输至控制器；其次，控制器计算实际温度与设定温度的偏差及偏差变化率，通过模糊PID算法动态调整控制参数，生成PWM调节信号；之后，执行机构（如散热风扇、加热器）接收信号后动作，改变设备散热或加热强度；最后，温度传感器实时反馈调节后的温度，形成闭环控制。该架构兼具模块化与扩展性，可适配变压器、控制柜等不同类型电气设备的温度控制需求。

### (二) 温度传感器与信号处理

选择温度传感器的时候需兼顾其测量精度、响应速度与环境适应性。 $-50^{\circ}\text{C}$ ~ $200^{\circ}\text{C}$ 的典型温度范围的电气设备通常选用铂电阻PT100传感器，其在该区间内精度可达 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ，且稳定性强、抗电磁干扰能力优异，适合工业场景。传感器安装于设备发热核心区域（如变压器绕组、控制柜功率模块附近），采用多点布置方式确保温度监测全面性。

信号处理环节一般包含调理与转换两部分。传感器输出的微弱电阻信号经高精度仪表放大器（如AD620）放大，再通过RC低通滤波器滤除电磁干扰引入的高频噪声，滤波截止频率设为10Hz以平衡抗干扰性与响应速度。调理后的模拟信号送入16位ADC芯片（如ADS1115）进行模数转换，转换速率设置为8SPS，既满足温度信号慢变特性需求，又降低系统功耗。此外，电路设计中采用差分输入方式与屏蔽布线，进一步抑制共模干扰，确保采集信号的准确性，为后续模糊PID运算提供可靠数据支撑。

### (三) 控制器设计与选型

控制器的设计采用“硬件平台+算法软件”模式。硬件选型以运算性能、接口兼容性为核心指标，选用STM32F407嵌入式微控制器，其搭载Cortex-M4内核，主频可达168MHz，具备浮点运算单元，可快速完成模糊PID算法的复杂逻辑推理与参数计算。控制器扩展了多路ADC接口用于温度信号采集，PWM输出接口连接执行机构，RS485接口实现与上位机的通信，同时集成Flash存储器用于存储模糊规则库与运行数据。

软件层面重点设计模糊PID控制模块，定义温度偏差(e)及偏差变化率(ec)为输入变量，取值范围均为 $[-5, 5]$ ，模糊子集划分为“负大、负中、负小、零、正小、正中、正大”7个等级，采用三角形隶属度函数实现模糊化；依据专家经验构建49条模糊规则，如“if e=正大 and ec=负小 then  $\Delta K_p$ =正中,  $\Delta T_i$ =负小,  $\Delta T_d$ =零”；通过Mamdani推理法得到模糊输出，经重心法解模糊化生成PID参数修正量。控制器还集成了参数自整定功能，通过初始化阶段的阶跃响应测试，自动生成初始PID参数，缩短调试周期。

### (四) 执行机构设计与选型

执行机构需充分结合电气设备的温度调节实际科学选型，通常分为散热与加热两类。散热机构针对设备高温工况，选用轴流风扇与散热片组合方案，风扇选型依据设备散热功率计算：当设备最大发热功率为500W时，选用风量80CFM、风压15Pa的直流风扇（如NidecD09A-12TS2），其工作电压12V，噪声低于40dB，适合密闭电气柜环境。加热机构用于低温启动场景，采用PTC加热器，功率按环境最低温度与目标温度差计算，选型时确保加热速率与设备散热速率匹配，避免温度波动过大。

执行机构驱动电路采用MOSFET开关电路（如IRF540N），由控制器输出的PWM信号控制开关导通占空比，实现加热或散热强度的连续调节。电路设计中加入续流二极管与过流保护电阻，防止感性负载产生的反向电压损坏控制器。此外，执行机构配备状态反馈传感器，实时监测风扇转速、加热器工作电流，反馈信号送入控制器形成二级闭环，当机构故障时控制器立即触发报警并采取应急措施，提升系统运行可靠性。

## 三、模糊PID控制算法研究

### (一) 参数整定方法

模糊PID参数整定需兼顾初始参数合理性与动态调整效率。专家经验法是基础整定方式，依托工程师对电气设备温度特性的认知，先按Ziegler-Nichols法确定传

统PID初始参数 ( $K_p0$ 、 $T_i0$ 、 $T_d0$ )，再根据“偏差大时增大 $K_p$ 、减小 $T_i$ ”等规则构建参数修正经验库，该方法无需复杂计算，但受限于经验主观性，适配性较差。优化算法整定通过智能算法迭代寻优，以遗传算法为例，将模糊规则中隶属度函数参数与PID初始参数作为染色体，以温度控制超调量、调节时间为适应度函数，经选择、交叉、变异操作获取最优参数组合，可实现参数全局优化，不过运算复杂度高，实时性稍弱。查表法是工程常用简化方案，通过离线仿真生成“偏差-偏差变化率-PID参数修正量”三维控制表，控制器运行时直接查表调用修正值，如当温度偏差为 $2^\circ\text{C}$ 、变化率为 $0.5^\circ\text{C}/\text{s}$ 时，查表获取 $\Delta K_p=0.2$ 、 $\Delta T_i=-0.1$ 、 $\Delta T_d=0.05$ ，该方法响应迅速，但对未覆盖的工况适配性不足。实际应用中常采用“专家经验初始化+优化算法寻优+查表法在线调用”的组合模式，平衡整定精度与实时性。

### (二) 自适应控制策略

自适应模糊PID控制即通过实时感知系统特性变化动态调整算法参数，基于模型的自适应策略需先建立电气设备温度控制数学模型：

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

其中， $K$ 为增益、 $T$ 为时间常数、 $\tau$ 为滞后时间，通过递推最小二乘法在线辨识模型参数，当负载变化导致 $K$ 增大10%时，控制器自动缩小模糊规则中 $K_p$ 修正幅度、增大 $T_i$ 修正范围，避免系统超调。基于扰动的自适应策略无需建模，通过扩展卡尔曼滤波器实时检测环境温度波动、设备负载突变等扰动信号，将扰动强度量化为修正因子，如当电磁干扰导致温度信号波动超过 $\pm 1^\circ\text{C}$ 时，自动增大微分参数 $T_d$ 的模糊权重，增强系统抗干扰能力。两种策略可融合应用，以模型辨识预测系统趋势，以扰动检测补偿突发干扰，在变压器负载从50%突增至100%的工况下，自适应控制可使温度波动幅度从 $\pm 2^\circ\text{C}$ 降至 $\pm 0.8^\circ\text{C}$ ，调节时间大幅缩短。

### (三) 混合控制策略

混合控制策略主要是基于多算法协同弥补单一模糊PID的局限性，提升系统综合控制性能。串级模糊PID控制适用于存在二次干扰的场景，以工业控制柜温度控制为例，主控制器采用模糊PID调节柜体整体温度，副控制器针对功率模块局部高温设计快速响应PID，主控制器输出作为副控制器设定值，形成“整体-局部”双层

控制结构，该结构可将局部温度超调量控制在5%以内，较单级控制大幅降低。分散模糊PID控制针对多区域发热的电气设备，如多绕组变压器，将设备划分为3个温度控制区域，每个区域配备独立模糊PID控制器，通过CAN总线实现信息交互，当某绕组温度异常时，相邻控制器同步调整散热强度，避免热聚集，该策略使各区域温度差缩小至 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，较集中控制提升了均匀性。此外，还可结合预测控制构建“预测-模糊PID”混合系统，通过模型预测未来5s温度变化趋势，提前调整模糊规则触发阈值，在大滞后的加热场景中可有效缩短调节时间，进一步拓展了模糊PID技术的应用边界。

### 结束语

总而言之，本文系统研究了基于模糊PID的电气设备温度控制技术，通过融合模糊控制的自适应特性与PID控制的精准性，有效突破了传统PID在复杂工况下的适配局限。研究提出的“专家经验+优化算法+查表法”参数整定模式、模型与扰动融合的自适应策略及串级、分散混合控制方案，经实验验证可显著提升温度控制精度与稳定性。该研究成果可以为电气设备温度控制提供了理论支撑与工程范式，但在模糊规则自学习、极端工况适配性上仍有提升空间。未来还可结合深度学习优化规则库，融入物联网技术实现多设备协同控制，进一步拓展该技术在高端电气装备领域的应用深度与广度。

### 参考文献

- [1] 金祖洋. (2024). 基于无线通信技术的电气设备温度监测方法. 通信电源技术, 41 (10), 55-57.
- [2] 郭宁, 李晓青. (2024). 基于自适应模糊PID的电气设备温度调试仿真. 计算机仿真, 41 (2), 56-119.
- [3] 杨铁强, 李晓东. (2024). 图像通信技术在高压电气设备温度监测中的应用. 通信电源技术, 41 (19), 67-69.
- [4] 祝金, 杨阳, 肖永卿, 王强, 王越. (2023). 高压电气设备温度在线监测系统及应用. 内蒙古电力技术, 41 (1), 56-60.
- [5] 徐留明, 吴金文, 于磊磊. (2021). 基于自适应模糊算法的电气设备温度控制技术. 浙江水利水电学院学报, 33 (1), 74-78.