

PID 算法在工业自动化温控系统中的优化应用

刘功绍

广西 玉林 537600

DOI:10.61369/ERA2025100017

摘 要： 介绍 PID 控制算法组成及局限，阐述工业温控系统建模、参数辨识的关键作用，提出双种群协同搜索、闭环整定等算法优化 PID 参数，还涉及模糊逻辑规则库构建等内容，通过应用验证体现优化效果，展望后续研究方向。

关 键 词： PID 控制；工业温控；算法优化

The Optimal Application of PID Algorithm in Industrial Automation Temperature Control System

Liu Gongshao

Yulin, Guangxi 537600

Abstract： This paper introduces the composition and limitations of the PID control algorithm, elaborates on the key roles of modeling and parameter identification in industrial temperature control systems, proposes algorithms such as dual-population cooperative search and closed-loop tuning to optimize PID parameters, and also involves the construction of a fuzzy logic rule base and other contents. The optimization effect is demonstrated through application verification, and the subsequent research directions are looked forward to.

Keywords： PID control; industrial temperature control; algorithm optimization

引言

在工业自动化领域，温控系统的精准控制至关重要。2023 年发布的相关工业自动化政策强调了提高生产效率和质量、降低能耗的重要性。PID 控制算法作为常用的温控方法，由比例、积分、微分环节组成，但传统算法在面对时变、非线性系统时存在局限。工业温控系统需进行系统建模与参数辨识，同时考虑多种扰动因素。为优化控制性能，构建双种群协同搜索机制、开发闭环整定算法、建立模糊决策模型等方法被提出，这些方法有助于提升系统的控制精度、稳定性和能效，符合政策导向，推动工业自动化温控系统的发展。

一、PID 控制算法基本原理

（一）控制算法构成原理

PD 控制算法由比例 (P)、积分 (I)、微分 (D) 三个环节组成，其中比例环节的数学模型为比例系数，为偏差信号，作用是对偏差进行即时反应，偏差越大控制作用越强；积分环节的数学模型在连续系统下为积分系数、在离散系统下为主要用于消除系统的稳态误差；微分环节的数学模型在连续系统下为微分系数、在离散系统下为，能根据偏差的变化趋势提前给出控制作用^[1]。

（二）传统 PID 算法适用性局限

传统 PID 算法在工业自动化温控系统中存在适用性局限。固定参数的 PID 算法在面对时变、非线性系统时，其控制效果往往不理想。在时变系统中，由于系统的参数随时间变化，而 PID 算法的参数固定，无法实时适应系统的动态变化，从而导致稳态误差的出现^[2]。例如，在一些化工生产过程中，温度随反应进程不断变化，固定参数的 PID 难以精确控制温度。在非线性系统中，系

统的输入和输出之间不存在简单的线性关系。PID 算法基于线性控制理论，对于非线性特性难以有效处理，容易产生超调现象。这可能会导致系统的不稳定，影响生产过程的正常进行。

二、工业温控系统特性分析

（一）系统建模与参数辨识

工业温控系统的系统建模与参数辨识是实现精准控制的关键。对于温控对象，可建立以传热方程为主导的数学模型。传热过程涉及热量的传递与交换，通过对热传导、对流和辐射等传热方式的分析，构建符合实际工况的数学表达式，以此描述温度变化与各种影响因素之间的关系^[3]。在参数辨识方面，提出基于阶跃响应的方法。当系统输入一个阶跃信号时，观察输出温度的变化曲线。通过分析曲线的特征参数，如上升时间、稳态值、超调量等，来确定系统的关键参数。这些参数对于后续的 PID 算法优化至关重要，它们能够准确反映系统的动态和静态特性，为实现高

效、稳定的温度控制提供基础。

（二）多扰动环境响应特性

在工业环境中，温控系统面临多种扰动。生产环境变量扰动如温度、湿度的变化，会影响系统的控制精度。当环境温度突然升高或降低时，系统需要快速调整以维持设定温度，这对系统的响应速度和稳定性提出挑战^[4]。温度传导的滞后性是关键因素，它会导致给定控制信号与实际动作之间存在偏差。例如，在加热或冷却设备中，执行机构立即响应控制指令，但是升温或降温的变化反馈有一定的延迟和误差，进而影响系统的稳定性和控制效果。这种滞环现象大小是有温度传导的层级、直接升温降温的作用功率，温度传导效率等多种因素引起，要提高温度控制的精度就需要找到对应升温的直接作用控制点。

三、PID 算法优化技术路径

（一）智能优化算法融合

1. 粒子群混合优化

构建双种群协同搜索机制实现控制器参数动态寻优。利用粒子群算法的快速收敛性的全局搜索能力。通过设立两个种群，采用粒子群算法进行独立搜索，并在一定条件下进行信息交互。粒子种群依据自身的速度和位置更新公式不断迭代，以快速逼近局部最优解。从而提高整体搜索效率，实现 PID 控制器参数的动态寻优，增强系统的控制性能^[5]。

2. 参数自整定策略设计

开发基于系统辨识的闭环整定算法实现运行阶段参数自动调节。该算法通过对系统的动态特性进行准确辨识，获取系统的数学模型，进而为 PID 参数的自动调节提供依据。利用系统输入输出数据，采用合适的系统辨识方法，如最小二乘法等^[6]，估计系统的参数。在此基础上，结合闭环控制理论，设计参数自整定策略。通过不断监测系统的运行状态，如温度偏差及其变化率等，根据预设的性能指标和整定规则，实时调整 PID 参数，以确保系统在不同工况下都能保持良好的控制性能，提高温控系统的稳定性和准确性。

（二）模糊自适应控制集成

1. 模糊逻辑规则库构建

在模糊逻辑规则库构建中，需定义温度偏差及变化率的隶属函数与模糊推理规则。对于温度偏差，要根据实际应用场景和控制要求确定其隶属函数的形式和参数，例如可采用三角形隶属函数、梯形隶属函数等^[7]。同时，要合理划分温度偏差的模糊子集，如负大、负中、负小、零、正小、正中、正大等。对于温度变化率，同样需确定隶属函数和划分模糊子集。模糊推理规则则是基于专家经验和实际控制效果来建立，描述温度偏差和变化率与控制量之间的关系，例如当温度偏差为正大且温度变化率为正小时，应采取相应的控制策略以实现有效的温度控制。

2. 在线参数调整机制

建立自适应因子实时修正 PID 增益参数的模糊决策模型是优化 PID 算法的关键。该模型基于模糊逻辑，将系统的误差和误差变化率作为输入，通过模糊规则推理得到自适应因子，进而实

时修正 PID 增益参数。这种方法能够使控制系统根据实际运行情况自动调整控制参数，提高系统的适应性和控制精度。同时，模糊决策模型的建立需要考虑系统的动态特性和不确定性，通过合理选择模糊集、隶属函数和模糊规则，确保模型的有效性和可靠性。该技术在工业自动化温控系统中具有重要的应用价值，能够有效提高温度控制的精度和稳定性，降低能耗和生产成本^[8]。

四、工业场景应用验证

（一）实验平台方案设计

1. 反应釜温度控制系统

在面向精细化工最高温度 350℃ 反应釜温度控制系统中，设计多测点的插入式温度传感器，以获取准确的反应釜温度及加热反应釜换热器导热油温度，导热油的循环频率，反应釜的搅拌频率控制该架构需考虑高温环境对硬件的影响，采用耐高温材料的反应釜、管道保温材料，采用耐高温的传感器仪表设备、导热油循环泵、反应釜搅拌电机满足现场高温生产的条件，确保控制器在恶劣条件下能稳定运行保证系统的控制精度。

控制器的核心处理单元应具备足够的运算能力，以快速处理温度反馈信息并准确输出控制信号。

为了减少系统升温过程中的超调及滞后性的问题，要进行 PID 算法的优化应用，提供可靠的硬件基础^[9]。反应釜的加热过程是导热油的热传导升温的过程，在控制过程中设置 PID 反应釜温控环及导热油温控环。

反应釜温控环用于给定反应釜的目标控制温度及输出，反应釜温控环的输出作为导热油温控制环的目标温度设定值，反应釜温控环的输出范围为导热油温度范围。通过 PID 计算给出导热油的温度目标调控系统。

导热油温控环的输出控制加热器的功率输出，输出范围为 0~100%。通过精细控制升温各个节点，模糊的导热油的目标温度随反应釜目标温度的变化而不断变化，从而达到精确控制温度的及降低能耗、避免超调的目标，使得系统快速温度达到反应最佳温度，提高生产效率及质量。

2. 注塑机温控单元改造

构建包含 8 路加热段的分布式智能温控网络系统，需对注塑机温控单元进行改造。该系统采用 PID 算法进行温度控制，通过合理配置硬件和软件，实现对各加热段温度的精确控制。硬件方面，选择合适的温度传感器、控制器和加热元件，确保系统的稳定性和可靠性。传感器需具备高精度和快速响应特性，以准确获取温度信息。控制器应能有效处理传感器反馈的数据，并根据 PID 算法计算出控制量。加热元件要能满足注塑机不同加热段的功率需求。软件设计上，要编写高效的 PID 控制算法程序，对采集到的温度数据进行实时分析和处理，动态调整加热功率，使温度稳定在设定值附近，从而提高注塑产品的质量和生产效率^[10]。

（二）实时控制性能验证

1. 阶跃响应对比测试

在工业场景应用验证的实时控制性能验证中，针对阶跃响应

进行对比测试。当设定值发生突变时，优化后的系统展现出卓越性能。传统系统往往会出现较大超调量，而此次优化后的系统超调量被成功控制在 3% 以下。这一显著成果得益于对 PID 算法的优化调整。通过精确的参数整定以及对系统动态特性的深入分析，使得系统在面对设定值的突然改变时，能够快速而稳定地做出响应，避免了过度的超调现象，从而保证了工业自动化温控系统的高效稳定运行，为工业生产过程中的温度控制提供了更精准、可靠的保障。

2. 抗扰动力验证

在工业场景应用验证中，针对 PID 算法在工业自动化温控系统的实时控制性能及抗扰动力进行了验证。在实时控制性能方面，通过对系统的实际运行监测，观察到 PID 算法能够快速响应温度变化，使温度稳定在设定值附近，控制精度较高。对于抗扰动力验证，模拟物料投料扰动这一工业常见情况。当发生物料投料扰动时，系统能够有效抑制温度波动，波动幅度被控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 范围内。这表明 PID 算法优化后的温控系统在面对工业生产中的干扰因素时，具有良好的稳定性和可靠性，能够满足工业自动化生产对于温度控制的严格要求。

（三）能效对比分析

1. 能耗计量分析

对优化前后的能耗进行计量分析，以此验证 PID 算法优化在工业自动化温控系统中的能效提升效果。通过精确的能耗计量设备，获取加热单元在一段时间内的能耗数据。原始 PID 算法运行时，加热单元的能耗处于较高水平。而采用优化后的 PID 算法后，经长期监测与数据统计，发现加热单元日均能耗显著降低，降低幅度达到 18.7%。这一数据清晰地表明优化算法在节能方面的

突出贡献，体现了其在工业场景应用中的巨大价值，为企业降低生产成本、提高能源利用效率提供了有力支撑。

2. 生产效率提升

在工业场景应用验证中，通过能效对比分析发现 PID 算法优化后对生产效率提升效果显著。温度调节周期缩短 40%，这直接影响了生产过程。对于产线而言，设备综合效率（OEE）指标提升了 22%。OEE 涵盖了设备的可用性、性能效率和产品质量合格率等多个关键因素。温度调节的优化使得设备运行更加稳定，减少了因温度波动导致的停机时间，从而提高了设备可用性。同时，稳定的温度环境有助于提高产品质量合格率，避免因温度不适宜产生的次品。而且，在性能效率方面，合适的温度保障了生产过程的顺畅进行，减少了生产环节中的延误，整体提升了产线的生产效率。

五、总结

PID 算法在工业自动化温控系统中通过建立参数优化与模糊决策相结合的改进算法，取得了良好效果。该算法提升了系统动态响应品质与能效水平。从实际应用数据来看，在温度控制精度、抗干扰能力和能源利用率方面都比传统 PID 控制方法更优。这为智能制造装备的精确控温提供了技术支持。同时，后续研究将朝着多变量解耦控制方向发展，这将进一步完善 PID 算法在工业自动化温控系统中的应用，有望解决更多复杂的温控问题，推动工业自动化温控系统更加高效、精准地运行。

参考文献

- [1] 李越男. 旋翼飞行器的优化 PID 算法研究 [D]. 湖北：长江大学，2023.
- [2] 刘岳飞. 基于先进 PID 算法的供暖系统室温控制技术研究 [D]. 内蒙古：内蒙古科技大学，2022.
- [3] 高智燃. 基于 LSTM 神经网络 PID 控制算法的麻醉靶控输注系统应用研究 [D]. 广东：广东工业大学，2022.
- [4] 赵佳乐. 水轮机调速系统参数辨识与 PID 参数优化 [D]. 江西：江西理工大学，2023.
- [5] 王永. 基于 PID 算法的振动模糊控制研究及仿真 [D]. 河北：华北理工大学，2021.
- [6] 张波. PID 算法在控制系统中的应用 [J]. 信息记录材料，2021，22(7):3.
- [7] 梁达平，赵利民，王鸿斌. 基于贝叶斯学习的 PID 温控算法在芯片烘箱中的应用 [J]. 电子与封装，2022(008):022.
- [8] 谢竹速，冯可. 改进的粒子群模糊 PID 算法在温控系统中的应用 [J]. 机电工程技术，2023，52(11):222-225.
- [9] 景希，高国伟. 基于 PID 调节的恒温控制系统 [J]. 计算机测量与控制，2021，29(4):110-114.
- [10] 张涵，刘铁军，刘波，等. 遗传优化 PID 整定算法在阀门定位器中的应用 [J]. 电子测量与仪器学报，2021(11):215-222..