

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.007

基于 PSO 算法的 IMC-PID 加热炉温度控制研究

周彤¹, 朱倩², 张奎奎³, 周通³, 王村松³, 薄翠梅¹

(1. 南京工业大学 电气工程与控制科学学院, 江苏 南京 211816;

2. 江苏省化工本质安全研究院, 江苏 南京 210009)

3. 南京工业大学 智能制造研究院, 江苏 南京 210009;

摘 要: 加热炉温度具有非线性、大滞后等特点, 且扰动的因素多, 传统 PID 控制器及其参数整定方法难以满足快速升温、无超调工艺控制要求。提出一种基于 PSO 算法的 IMC-PID 串级控制方法。应用内模控制理论对主控制器进行改进, 并运用 PSO 算法进行控制器参数优化整定, 提高控制系统的跟踪性能和抗干扰性能。进行数值仿真验证所设计控制系统对加热炉温度控制在模型匹配和失配条件 (参数 k 、 T 、 τ 均扰动 20%) 下的有效性和可行性。结果证明其具有快速响应和低超调特性。

关键词: 加热炉; 温度控制; 串级控制系统; 内模控制; PSO 算法

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)03-0038-05

Research on IMC-PID Heating Furnace Temperature Control Based on PSO Algorithm

ZHOU Tong¹, ZHU Qian², ZHANG Kuikui³, ZHOU Tong³, WANG Cunsong³, BO Cuimei¹

(1. College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. Jiangsu Academy of Chemical Inherent Safety, Nanjing 210009, China;

3. Institute of Intelligent Manufacturing, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: The temperature of the heating furnace has characteristics of nonlinearity and large hysteresis, with many disturbance factors, and traditional PID controllers and their parameter tuning methods suffer insufficiencies in meeting the requirements of rapid heating and non overshoot process control. This article proposes an IMC-PID cascade control method based on the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. Internal model control theory is applied to improve the main controller, and PSO algorithm is used to optimize and tune the controller parameters to upgrade the tracking performance and anti-interference performance of the control system. Numerical simulations are conducted to verify the effectiveness of the designed control system in controlling the temperature of the heating furnace under model matching and mismatch conditions (parameters k , T , τ Effectiveness and feasibility under uniform perturbation of 20%) with fast response and low overshoot characteristics.

Keywords: heating furnace; temperature control; cascade control system; internal model control; PSO algorithm

0 引言

加热炉作为石油化工生产过程的核心设备^[1], 在工艺介质的升温 and 气化过程起到关键作用, 其中加热炉的温度控制精度直接影响生产安全、反应效率和产品质量。在工业生产中, PID 控制凭借其结构简单、适应性强且无需准确的控制对象模型等特点, 被广泛用于加热炉的温度控制中^[2]。然而, 由于加热炉在加热升温过程中存在温度波动大、超调量大、响应时间长等问题, 传统的单回路 PID 控制系统往往难以取得理想的控制

效果^[3]。

近年来许多学者针对这一问题开展了多方面的改进研究。文献[4]设计了基于遗传算法优化的模糊 PID 真空退火炉温度控制系统, 实现对设备温度的稳定控制; 文献[5]提出了一种适用于通用型工业温度控制系统的模糊分数阶 PID 控制算法, 提高了生产质量和控制模型精度; 文献[6]设计了自适应 PID 控制器, 实现了加热炉各段温度的设定, 提高了加热炉的生产效率; 文献[7]提出基于迁移学习和知识蒸馏的炉温预测方法, 实现了对加热炉燃烧情况的精准控制; 文献[8]提

基金项目: 国家自然科学基金项目 (BM2021805)

第一作者简介: 周彤 (2001—), 女, 湖南郴州人, 硕士研究生, 研究方向为控制算法仿真, 1960393162@qq.com。

出一种带有 Smith 补偿环节的新型模糊 PID 控制方案对加热炉温度的控制效果;文献[9]设计了 BP 神经网络改进 PID 控制算法,提高了系统的适应能力和动态性能;文献[10]针对工业大滞后系统,提出了一种改进内模控制的方法,提高了系统的鲁棒性;文献[11]设计了一种基于自适应内模控制系统,使用内模控制模型并结合粒子群算法实现参数的在线辨识,提高了系统响应速度;文献[12]针对大滞后、非线性、且对象参数随流量变化的变结构温度控制系统,提出基于多模型切换的内模不完全微分 PID 控制方法,使系统有了更高的控制品质;文献[13]将内模控制与分数阶 PID 控制相结合,仿真结果证实了该控制系统对外部扰动与参数摄动的鲁棒性强,也可让控制系统具有良好跟踪性能;文献[14]提出内模控制(internal model control, IMC)结合 PID 控制算法相比传统 PID 提升了系统的动态响应性能和抗扰动性能;文献[15]将粒子群优化算法应用于加热炉温度控制中,对参数进行整定从而提升了控制品质。

上述研究中,IMC 方法因系统设计简便、控制性能优异的特点得到了广泛应用,并且结合 PID 控制器称之为 IMC-PID 控制策略。然而该控制

器在实际应用中参数整定难度较大,因此本文引入粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO),提出一种基于 PSO 优化算法的内模 PID 参数整定方法,对 IMC-PID 控制器参数进行参数寻优,该方法不仅能够有效提高系统的稳定性与控制品质,还能实现更优的动态性能与鲁棒性。

1 加热炉串级控制系统设计

由于加热炉温度控制系统具有时间常数大、滞后时间长等动态特性,且在实际运行过程中经常伴随较大的扰动幅值和频繁的负荷变化,因此传统单回路温度控制方法难以满足系统对快速响应与高稳定性的要求。针对上述特点,采用串级控制系统进行加热炉温度调节。

在加热炉温度系统串级控制系统中,外环采用内模控制器实现温度回路的调节,内环设计 PI 控制器用于加热炉流量回路的快速响应与稳定控制。通过串级控制结构,能够有效提高系统的动态性能与抗扰动能力。

1.1 温度主系统 IMC-PID 控制器设计

选择串级控制作为加热炉温度控制方法,在主回路引入内模控制,与流量回路构成串级结构,如图 1 所示。

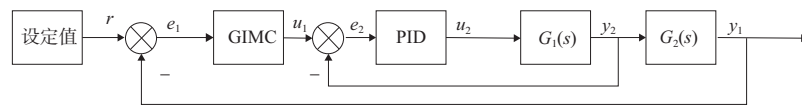


图 1 串级内模控制框图

对加热炉温度对象的动态特性进行分析,归纳为一阶惯性环节加纯延迟环节简化模型,其表达式如下:

$$G(s) = \frac{K_1}{T_1 s + 1} e^{-\tau s} \quad (1)$$

引入一阶惯性环节的滤波器 $F(s)$, 即

$$F(s) = \frac{1}{\theta s + 1} \quad (2)$$

根据内模控制器设计规则可成功构建内模控制器如下:

$$G_{\text{IMC}} = G_{\text{pl}}(s)^{-1} F(s) = \frac{T_1 s + 1}{K_1(\theta s + 1)} \quad (3)$$

在 IMC 控制器中,只存在一个可调节的参数 θ ,该参数与模型的参数直接相关,而 θ 的值决定了整个系统的鲁棒性和快速响应性能的优劣^[16]。

1.2 流量副系统控制器设计

在副回路设计 PI 控制器对加热炉流量系统

进行控制,其表达式为

$$G_{c2}(s) = K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s} \quad (4)$$

由图 1 分析可知流量控制系统设定值 $r_2(t)$ 由温度控制器输出 $u_1(t)$ 给定,即

$$r_2(t) = u_1(t) \quad (5)$$

流量系统误差 $e_2(t) = u_1(t) - y_2(t)$,作为流量 PI 控制器的输入(图 1)。

温度控制器中内模控制器选取较为困难。为优化温度控制器参数的选取,使系统得到更佳的控制品质,可以引入 PSO 算法用于控制器参数整定。

2 基于 PSO 的 IMC-PID 控制器参数整定

本文引进内模控制思想是针对 IMC-PID 控制在参数整定时具有盲目性,因此提出了一种基于 PSO 算法的 IMC-PID 控制策略,其控制框图如图 2 所示。

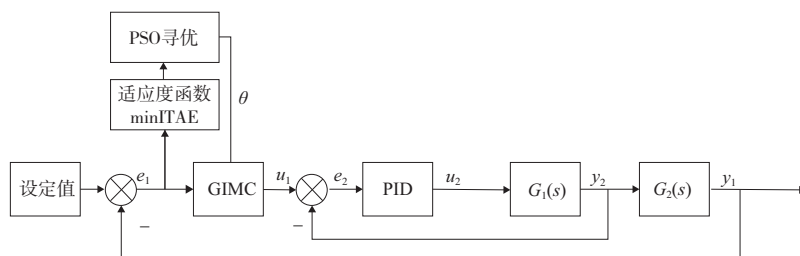


图2 基于 PSO 算法的 IMC-PID 结构框图

在本研究中,粒子群优化(PSO)算法以最小化时间加权绝对误差积分(integral of time-weighted absolute error, ITAE)作为优化目标函数,表达式如下:

$$J_{ITAE} = \int_0^t |e(t)| dt \quad (6)$$

式中: $e(t)$ 为系统的瞬时误差; t 为时间变量。

通过最小化 ITAE 指标,可以有效提升控制系统的动态响应速度并降低稳态误差。基于标准 PSO 算法 IMC-PID 控制器参数的流程图如图 3 所示。

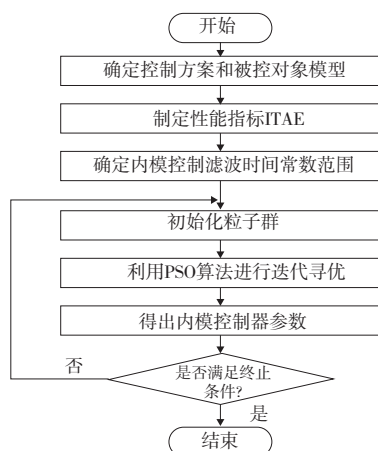


图3 基于 PSO 算法的控制参数整定流程图

PSO 算法通过模拟鸟群觅食过程中群体协作与信息共享的机制,动态调整粒子的速度与位置,以实现最优解的逐步逼近。该算法具有良好的全局搜索能力和较低的计算复杂度,能够适应任意形式的目标函数,因而在复杂优化问题中展现出优异的应用潜力。在 IMC-PID 控制器参数整定过程中,PSO 算法可用于优化滤波器时间常数等关键参数,通过迭代更新策略有效提高控制系统的动态性能和鲁棒性。

3 仿真结果分析

为验证所提出的控制方法对加热炉温度控制

系统的适用性,利用 Matlab 对所设计的温度系统进行数值仿真。根据文献[17],温度和流量对象参数分别选取为 $K_1 = 3, T_1 = 852, K_2 = 5, T_2 = 4$, 并给系统一个扰动在 500 s 后加入系统。

应用工程控制中介绍的工程整定方法,本文对实际的 PID 控制器参数进行了微调,得到了如下参数。对于温度系统控制器 $u_1(t)$, 控制器比例、微分、积分参数分别为 $K_{p1} = 40, K_{i1} = 1, K_{d1} = 0.1$ 。对于流量系统控制器 $u_2(t)$, 使用试凑法选取流量控制器参数分别为 $K_{p2} = 20, K_{i2} = 0.8$ 。

3.1 模型匹配情况下

基于文献[18]提出的最大灵敏度的参数整定方法,得到 IMC 控制器参数 $\theta = 7$; 初始化种群规模为 50, 进行 100 次迭代, 以最小化 ITAE 为性能指标 PSO 算法寻优得到 IMC 控制器参数 $\theta = 2.4$ 。

从图 4 和表 1 的仿真结果数据分析, 在模型匹配情况下, 应用基于 PSO 内模 PID 控制算法的阶跃响应曲线控制精度全部维持在 $\pm 1\%$ 的范围之内, 同时超调量保持为 0, 而调整时间也都不超过 1 min。在 50 s 左右实际温度逐渐趋近设定温度, 满足加热炉的温度控制要求。另外, 当给系统一个扰动, 基于 PSO 的内模 PID 算法在适应系统工况变化方面具有更出色的能力, 在确保平稳过渡、实现目标精度以及实现快速反应这三个方面得到了明显的提升。

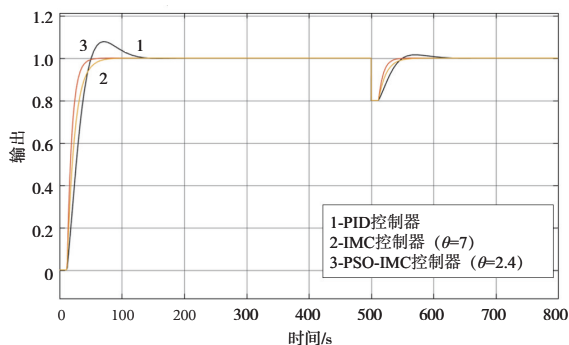


图4 模型匹配情况仿真结果

表 1 模型匹配情况下仿真结果对比

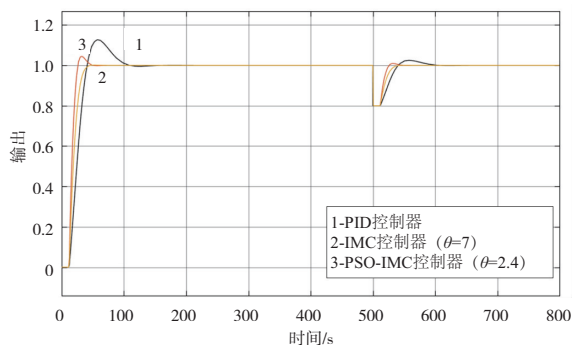
控制器	PID	IMC	PSO-IMC
超调量/%	9.2	0	0
上升时间/s	43.7	43.0	39.1
调节时间/s	112.0	40.3	19.5

3.2 模型失配情况下

在工程中,实际系统的参数会随着环境和时间的变化而改变。如果假定被控对象的参数 k 、 T 和 τ 发生了 20% 的参数摄动,这将导致模型与被控对象不匹配。

1) 参数 k 摄动 20%

从图 5 的响应曲线和表 2 的仿真数据分析,当内部模型与控制对象不适配时,采用基于 PSO 的内模 PID 控制算法在响应速度和调节时间方面表现更为出色,相比于普通 IMC-PID 控制手段更加能够适应加热炉的温度控制。虽然系统含有少许超调量,然而这种算法可以更迅速、精准地重新跟踪设定值。而且与传统 PID 控制算法相比,基于 PSO 的 IMC-PID 控制算法可以避免在恢复到设定值时出现明显波动的情况,尤其在控制状态下的扰动实验中表现得更加稳定。

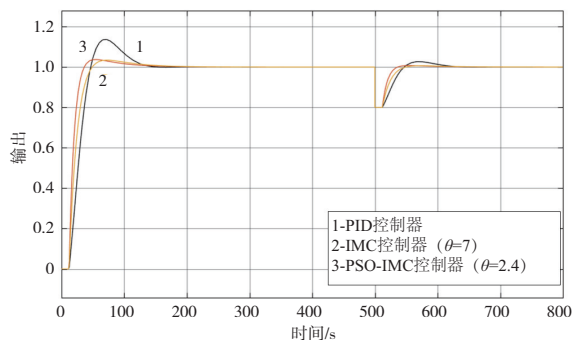
图 5 放大系数 k 引起的模型失配表 2 放大系数 k 引起模型失配仿真结果对比

控制器	PID	IMC	PSO-IMC
超调量/%	14.2	0	3.3
上升时间/s	42.3	28.7	18.8
调节时间/s	127.8	63.6	59.1

2) 参数 k 、 T 、 τ 均摄动 20%

从图 6 的响应曲线和表 3 的仿真数据对比分析,当内部模型不匹配时,系统在应用内模 PID 算法的控制下不仅表现出更出色的动态性能,且上升时间更加短,超调量显著降低;还展示出了优良

的多工况适应能力和抗扰动性能,提出的基于 PSO 算法的 IMC-PID 控制器在上升时间和调节时间都更加优于 IMC 控制器。综上,基于 PSO 内模 PID 控制算法能够有效地减少多种干扰因素对加热炉温度控制系统的影响,提升了对加热炉温度的控制品质。

图 6 参数 k 、 T 、 τ 引起的模型完全失配表 3 参数 k 、 T 、 τ 引起的模型完全失配仿真结果

控制器	PID	IMC	PSO-IMC
超调量/%	16.6	5.3	5.1
上升时间/s	46.9	41.8	32.1
调节时间/s	111.20	113.40	111.25

4 结语

本文提出了一种以 PSO 为基础的 IMC-PID 控制方法,在加热炉上验证了该方法的优越性。基于 PSO 算法的 IMC-PID 控制器超调量小、响应速度快、调节时间短,呈现出出色的控制品质。此外,在过程模型参数发生摄动情形时提升了系统的动态性能和抗干扰能力。

本研究运用了 PSO 算法的单目标优化方法,在控制器参数的调整中取得了显著效果。然而,多目标优化也是一个极具实际意义的课题。在未来的研究中,可以考虑对控制器参数进行多目标优化或者引入自适应算法来优化 PID 控制器的参数,这将为进一步的研究和实践提供有益的方向。

参考文献:

- [1] WANG M L, ZHANG M G. Dynamic risk assessment of oil and gas leakage in heating furnace: a DBT-DBN approach [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1827(1): 012097.
- [2] 熊昌炯,王春荣,夏尔冬. 基于改进 PID 算法的加热炉温度控制研究[J]. 中国设备工程, 2022(12): 101-102.

- 收稿日期:2023-08-31

- [11] VO N Y P, LE T D. Analysis model of restoring force of a rubber air spring [J]. Journal of Vibroengineering, 2021, 23(5): 1138-1147.
- [12] 李占芳, 肖兴明, 马驰. 提升罐道水平振动故障模型仿真研究[J]. 矿山机械, 2006, 34(11): 65-66, 5.
- [13] 徐璐, 饶晓波, 褚衍东. 磁悬浮转子-轴承碰摩系统的非线性动力学行为[J]. 机械强度, 2020, 42(1): 7-14.
- [14] 张丹伟, 黄建亮. 多激励作用下的矩形薄板横向非线性振动分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(23): 174-179.
- [15] 杨一帆, 王红兵, 李国芳, 等. 一类二自由度非线性能量阱系统的减振性能分析[J]. 力学与实践, 2021, 43(1): 66-73.
- [16] CAO S X, ZHANG R J, ZHANG S H, et al. Roller - rail parameters on the transverse vibration

- 收稿日期: 2023-09-04