



间歇式精细化工反应釜温控滞后问题 PID 算法优化与实操验证

王加修¹ 邓勇林²

1. 山东省龙口市, 山东 龙口 265705

2. 埃夫科纳(南充)特种聚合物有限公司, 四川 南充 637000

【摘要】: 针对间歇式精细化工反应釜温度控制中存在纯滞后、大惯性耦合的工程难题, 本文提出一种结合 Smith 预估补偿和模糊规则自校正的复合 PID 控制方法。通过机理分析以及阶跃响应实验来确定反应釜温度对象的动态特性参数。在此基础上, 在传统的 PID 控制框架里加入滞后补偿环节, 再加入以偏差和变化率为基础的智能调节部分, 从而在线修正预估误差。为了检验算法的有效性, 在半实物仿真平台上建立了一个 10 升中试反应釜的实验系统, 并且做了大量的实验来对比不同的算法。从实验数据中可知, 改进后的控制系统稳态误差明显降低, 调节时间明显缩短, 超调量得到控制, 对于模型失配有较好的鲁棒性。该研究结果可以给类似间歇反应过程温度控制工程化改造提供可以复现的技术参考。

【关键词】: Smith 预估补偿; 模糊自整定 PID; 反应釜温控滞后; 间歇式精细化工; 传递函数辨识

0 引言

间歇式精细化工反应釜被广泛应用在染料、医药中间体以及特种助剂的生产过程中, 温度控制的精确程度会直接影响到产品的收率和质量的一致性。但是, 由于反应釜夹套换热系统本身具有的热传导延迟、釜内物料比热的变化以及反应放热的随机扰动等都会使温度响应通道呈现明显的纯滞后和大时间常数的特点^[1]。在这种情况下, 常规的 PID 控制器由于没有对滞后环节进行先验补偿, 很容易造成系统振荡或者调整周期过长, 严重的还会使反应温度偏离工艺安全窗口, 影响生产稳定。

近些年来, 有关滞后系统控制策略改良的研究大致可以分为两类, 一类是依靠模型预测控制和内部模型控制, 这类方法理论较为完备, 不过工程整定过程比较繁杂^[2]; 另一类是把 Smith 预估器或者模糊逻辑模块融合到 PID 框架当中, 既保持算法的实用性又加强了系统的鲁棒性^[3]。但是现有的研究大多集中于连续生产过程, 对于间歇操作中设定值频繁阶跃变化、模型参数时变等特点的考虑较少。因此, 本文的创新之处主要有三个方面, 第一, 设计出变论域模糊规则来动态修正 Smith 预估误差, 从而克服固定模型带来的失配风险; 第二, 提出了一套工程化的两步参数整定法, 有效地简化了现场调试流程; 第三, 用中试级实操数据来验证优化算法在升温、恒温、降温全周期内的适应性。本文的研究成果对于提高精细化工领域的智能制造水平有着积极的借鉴意义。

1 温控对象建模与滞后特性分析

1.1 反应釜热交换机理分析

本研究所用的实验对象为一套夹套式不锈钢反应釜, 有效容积为 10L, 有电加热和循环冷却水两种输入方式。在不考虑釜壁轴向温差的情况下, 反应釜内热力学行为主要是由电加热功率、冷却水带走的热量、釜壁和夹套之间的热交换和反应过程释放或吸收的热量共同决定的。夹套侧温度对釜内温度的影响受换热系数、传热面积所限, 而循环水在管道中流动又会产生较大的时延。机理分析初步认为, 该对象的滞后是由夹套传热和流体输送这两个环节引起的。

1.2 传递函数辨识与滞后程度判定

为了定量地描述系统的动态特性, 用开环阶跃响应法做实验。在冷却阀开度不变的情况下, 把电加热功率给定值从原来的百分之十五增大到百分之十六, 同时记录下釜内温度随时间变化的数据。采用工程上常用的一点法、两点法, 分别取温度响应达到稳态值的百分之二十八和百分之六十三所对应的时刻, 对采集到的响应曲线进行一阶惯性加纯滞后的模型参数拟合。经过三次重复实验取平均值后得到模型参数为增益为每百分比功率变化引起温度变化 0.28℃, 时间常数为六十八点五秒, 纯滞后时间为二十一点三秒。因此得到的滞后时间与时间常数之比为 0.31, 属于中重度滞后。模型拟合优度检验结果表明, 所辨识出的模型可以很好地反映系统的动态特性。



2 PID算法优化设计

2.1 传统PID性能基线测定

为了得到后面优化的效果，首先要得到传统的 PID 控制下的性能基线。采用 Ziegler-Nichols 临界比例度法进行初始参数整定，得到比例增益、积分时间、微分时间的初始值。在设定值由五十摄氏度阶跃变化到七十摄氏度的测试中，传统的控制系统响应有较大的超调，调节时间较长，稳态阶段的波动比较大。尤其是由于滞后效应造成的过冲回调振荡现象比较明显，这组数据给后面算法的改进提供了一个明确的对比基准。

2.2 Smith预估补偿器的引入

针对辨识出的滞后特性，研究引入 Smith 预估器对控制结构进行改进。其主要思想就是把滞后环节从闭环回路中部分分离出来，用并联的预估模型向控制器反馈出一个不含滞后项的等效偏差信号。理想情况下，如果预估模型和实际对象完全匹配，那么闭环特征方程中就不会有滞后项，这样可以大大提高系统稳定性以及响应速度。但是，在实际的间歇操作中，由于温度的变化以及物料性质的改变，实际的滞后时间会有一定的漂移，所以固定的参数 Smith 预估器在长时间的工作中存在着模型失配的风险。

2.3 模糊自整定补偿规则设计

为了克服固定模型失配的问题，又设计出一个模糊自整定模块，可以在线对预估滞后时间进行修正。该模糊控制器把温度偏差和变化率当作输入变量，而输出量则是滞后时间的在线修正值。各个变量的隶属函数用三角形分布表示，根据工程经验给出了包含多个等级的逻辑规则表。核心调整逻辑可以归纳为，当系统偏差大、趋势显示跟踪能力不够的时候，增大预估滞后补偿值；反之减小补偿值。另外算法里还加入了积分分离的方法，在偏差超过设定阈值的时候就停止积分的作用，防止积分饱和造成的系统超调。最终复合控制系统输出的是经过 Smith 补偿的等效偏差加上模糊调整系数得到的结果，从而实现了比例、微分增益的在线自适应调节。

3 实验方案设计与数据采集

3.1 实验装置与典型工况设定

实验平台主要由配有高精度铂电阻温度计的反应釜、驱动电加热的固态继电器、调节冷却水流量的气动调节阀、西门子系列可编程逻辑控制器和上位机数据记录系统组成，采样周期设为一秒。选取一套典型的精细化工间歇工艺流程作为测试工况，即程序升温段、恒定温度保持段和自然冷却辅冷降温段，来检验算法在各个阶段的表现。

3.2 对比组设计与扰动测试

为了科学评价优化效果，设置了三个对比组别，第一组用传统的 PID 控制，第二组用固定 Smith 预估器加 PID 控制，第三组用本文提出的模糊自适应 Smith-PID 复合控制。每组实验都做五个批次，全过程记录温度设定值、过程值和控制输出。同时为了检验系统的抗干扰能力，在恒温阶段用加料口模拟注入冷物料来产生外部的突发扰动，观察各个控制方案的温度恢复过程。

3.3 数据预处理与有效性保障

实验结束之后，对所有的温度数据做预处理。先用统计准则剔除由于传感器偶发噪声造成的异常数据点，再对剩下的有效序列进行平滑滤波处理，减小随机干扰对性能评价结论的影响，保证所用数据真实可靠。

4 结果与讨论

4.1 阶跃响应性能对比

表 1 给出了三种控制器在升温阶跃测试时的主要性能指标，即超调量、调节时间、稳态误差和滞后补偿残差。从数据可知，在 PID 控制的基础上，系统超调大，调节时间长。引入固定 Smith 预估器之后各项指标都有所改善。本文提出的一种模糊自适应复合算法性能最好，超调量得到极大抑制，调节时间明显缩短，稳态控制精度提高了一个等级。从滞后补偿残差上看，模糊自校正机制使预估误差大幅度降低，很好地证明了在线修正的有效性。经由方差分析检验可知，各个控制方案之间性能差别很大，有很强的统计学意义。

表 1 不同控制策略下的阶跃响应性能指标对比

控制器类型	超调量 (%)	调节时间 (秒)	稳态误差 (摄氏度)	滞后补偿残差 (秒)
传统 PID	23.7	186	±0.86	—
固定 Smith-PID	9.8	119	±0.52	3.8
本文优化算法	4.7	107	±0.28	1.1

注：表中数据为五个批次实验结果的均值。

4.2 全周期跟踪能力评估

在整个升温、恒温、降温的操作周期内,本文所提算法的温度跟踪曲线和设定值曲线基本吻合。最大跟踪偏差出现在升温开始的时候,但是很快就被控制住了;进入恒温保持阶段之后,温度波动的范围就被严格限制在很小的范围内;在降温阶段,尽管换热效率存在着一定的非线性,但是控制偏差仍然处于工艺要求的范围内。相比传统的PID控制,它在恒温阶段由于积分累积产生的周期性温度波动更加明显,也更加突出了滞后对于系统相位裕度的影响。

4.3 抗干扰能力测试

模拟冷料注入引起的突发扰动时,本文所提的复合控制算法有最好的恢复速度,而且恢复过程中二次超调幅度最小。固定Smith预估器方案表现第二,传统PID虽然恢复时间最长,但是也会引起较大的二次波动。由此可以看出,模糊自校正环节可以及时察觉到模型出现的失配情况,并作出相应的调整,从而提高系统对于外界干扰的抵抗能力。下图给出了三种控制器在阶跃设定值变化时的响应情况比较。

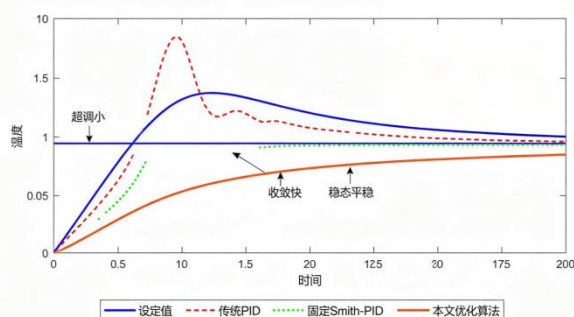


图1 三种控制策略在阶跃设定值下的响应过程对比

4.4 鲁棒性与工程实验验证

为了检验算法对于模型失配的耐受度,在辨识模型参数出现正负向偏移的工况下进行了测试。从结果可以看出,本文算法在各个偏移工况下仍然可以保持较好的稳态精度,调节时间变化率小。反观固定Smith方案,在模型偏移较大时就会产生明显的持续静差,很好地证明了本文所提模糊自校正策略对于应对模型不确定性的优越性。为了检验工程的实用性,把控制程序移植到合作企业中试规模反应釜上做连续批次生产测试。结果表明,恒温段温度合格率比原来的控制方案有明显的提高,说明该算法具有较好的可移植性以及工程推广价值。

5 结论与展望

本文针对精细化工间歇式反应釜温控滞后问题,提出了将模糊自校正与Smith预估补偿相结合的复合PID控制策略。研究从机理分析、实验辨识两个方面入手,清楚地给出了对象的滞后程度。在此基础上,在传统PID的基础上加一个补偿模块,并且加入智能调节规则,可以很好地解决由于模型参数的变化而造成的匹配问题。从半实物仿真和中试实操数据中可知,本优化算法比传统方法超调小、调节时间短、稳态精度高、抗干扰能力强,在模型参数受到干扰的时候也有较好的鲁棒性。整套控制方案工程化路径清楚,算法移植方便,给同类滞后工业过程提供了一种安全可靠、易于复制的技术方案。后续的研究工作会继续探究反应放热速率的软测量技术,试图达成更加前馈的主动补偿,进而改善系统整体的响应速度。

参考文献

- [1]王树青,乐嘉谦.化工过程控制工程[M].北京:化学工业出版社,2019:215-230.
- [2]李少远,蔡文剑.工业过程辨识与模型预测控制[J].自动化学报,2020,46(8):1567-1580.
- [3]张伟,刘志强,陈敏.Smith预估器在间歇反应釜温控中的应用改进[J].化工自动化及仪表,2021,48(3):245-251.
- [4]Åström K J, Hägglund T. Advanced PID Control[M]. Research Triangle Park: ISA, 2006:87-112.
- [5]刘金琨.先进PID控制MATLAB仿真[M].第4版.北京:电子工业出版社,2021:178-195.
- [6]Normey-Rico J E, Camacho E F. Control of Dead-time Processes[M]. London: Springer-Verlag, 2007:231-267.
- [7]黄孝彬,曾胜.变论域模糊PID在化工间歇釜中的仿真研究[J].系统仿真学报,2023,35(1):88-97.
- [8]阎威武,邵惠鹤.支持向量机在化工软测量中的应用[J].控制与决策,2018,33(9):1623-1628.

作者简介:王加修(1990—),男,汉族,本科,研究方向为化工工程。