

基于 Smith 预估补偿的聚丙烯反应器 自适应控制系统研究

杨朋飞¹, 张典², 刘逸飞¹

(1. 中海油石化工程有限公司, 济南 250013;

2. 青岛科技大学 自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266042)

摘要: 针对含有时滞的聚丙烯多区循环反应器温度串级控制系统为复杂的高阶系统, 被控对象的滞后时间较大, 且受到反应器内部放热、入口循环气温度、夹套水流量等干扰的影响, 系统过程控制较为困难; 通过以一阶惯性环节加纯滞后来逼近高阶系统, 应用模型参考自适应控制算法, 使自适应机构能够在线的整定反应器串级控制副回路的 Smith 预估器, 使副回路 Smith 预估器的动态特性与副被控对象的动态特性接近一致; 同时, 根据期望的性能指标, 在串级控制主回路设置一个参考模型, 再次应用自适应算法, 使得主回路被控对象的输出尽可能跟踪参考模型的输出; 仿真结果表明, 该控制系统对于具有时滞的聚丙烯反应器温度控制是有效的。

关键词: Smith 预估; 聚丙烯反应器; 自适应控制; 参考模型

Research of Polypropylene Reactor Adaptive Control System with Smith Predictive Compensation

Yang Pengfei¹, Zhan Dian², Liu Yifei¹

(1. CNOOC Petrochemical Engineering Co., Ltd., Jinan 250101, China; 2. College of Automation and

Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: For the polypropylene multi-zone circulating reactor cascade control system with time delay as a complex higher-order system, the controlled object has a large lag time, and the process control of the system is difficult due to the influence of internal heat release, reactor inlet temperature, water flow in the jacket and other disturbances. The first-order plus pure lag approach to the higher-order system is adopted, and the model reference adaptive control method is applied to make the online setting of the sub-loop Smith-predictor of the adaptive mechanism, which makes the dynamic of the Smith-predictor close to the dynamic of the sub-control object. At the same time, a reference model is set in the main loop according to the expected performance index, and adaptive algorithm is applied again to make the output of the controlled object in the winner loop track the output of the reference model as much as possible. The simulation results are employed to illustrate the effectiveness of this approach.

Keywords: Smith-predictor; polypropylene reactor; adaptive control; reference model

0 引言

聚丙烯聚合反应过程复杂, 反应器温度控制的平稳对产品的质量以及反应器运行的稳定具有非常重要的作用。由于内部反应放热及进料温度的影响, 聚合反应器的温度控制相对困难, 反应器的温度是通过冷却器冷却的循环气来控制, 循环气通过压缩机进入冷却器, 经过夹套水冷却后进入反应器来控制反应器的温度。以反应器温度和循环夹套水温度作为被控对象, 是典型的大时滞对象, 反应器和循环夹套水系统的干扰也较多, 这些都加大了反应器温度的控制难度, 采用常规的控制策略的控制系统基本上运

行效果较差, 对生产效率和产品质量影响较大。目前, 大多数聚丙烯装置的反应器采用的还是常规的串级控制系统, 以反应器温度为主被控对象, 循环气冷却器入口夹套水温度为副被控对象组成串级控制可以解决掉引入循环夹套水系统的干扰, 而对于对象的时滞问题却无法解决, 很难获得令人满意的控制效果。针对被控对象的时滞, 在副回路引入 Smith 预估补偿能够在一定程度上解决纯滞后问题, 但是由于聚合反应过程是一个复杂的物理化学过程, 工况变化频繁, 对于这种典型的非线性时变的系统, 单纯依靠机理分析很难准确的知道被控对象的数学模型^[1]。我们知道, Smith 预估补偿最关键的是要知道被控对象准确的数学描述, 并且在运行过程中对象的数学模型不会随着工况的变化而发生较大变化, 采用 Smith 和串级 PID 控制尽管能够在一定程度上解决时滞的问题, 但并不能较好地解决模型参数变化带来的不匹配问题^[2], 一些研究利用改进的 Smith 预估方法仍然不能从根本上解决^[3-4], 还有一些研究

收稿日期: 2018-08-23; 修回日期: 2018-09-07。

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2018LC010); 中海油炼化有限公司科研项目(KJFZ-14-2018)。

作者简介: 杨朋飞(1984-), 男, 山东临沂人, 硕士, 工程师, 主要从事石油化工过程控制方向的研究。

利用干扰进行补偿, 但仅仅解决了干扰的问题, 对被控对象的参数变化并没有解决^[5]。

要想在具有纯滞后的反应器温度串级控制系统应用 Smith 预估方法较好的解决纯滞后问题, 单纯依靠离线调整 Smith 预估器参数显然是不现实的, 而解决被控对象由于干扰导致参数变化频繁的一个有效方法就是自适应控制, 自适应控制目前在复杂时滞系统中已经有了广泛应用^[6]。聚丙烯反应器的聚合过程是高阶次的、时变的^[7], 那么设置的参考模型的特征多项式阶次应当高于实际系统的特征多项式阶次, 否则控制为物理不可实现的^[8-9]。本文通过以一阶系统逼近高阶系统的思路, 提出一种基于 Smith 预估补偿的串级自适应控制方法, 使主副回路的参考模型结构能够标准化, 使控制器的离线设计变为不断的在线设计以适应主回路和副回路被控对象的不确定性。仿真研究和对比实验表明了该方案的有效性。

1 聚丙烯反应器工艺特性

聚丙烯聚合反应器采用提升管的多区循环反应器, 在聚合反应器内实现多区循环聚合反应, 是聚丙烯装置的核心设备。丙烯和催化剂等的聚合物由反应器携带在高速流化床由下向上运动, 聚合反应是复杂的物理化学变化, 反应器通过冷却器的循环气来撤除反应热, 通过调节至冷却器的夹套水流量来实现温度控制。

聚合反应本身是放热反应, 反应器温度随着反应的进行逐渐升高, 温度是反应活性最直接的显示, 温度升高表示聚合反应速率也升高, 这是一个正反馈, 容易导致反应器的温度过度升高, 为了防止聚合物结块, 必须将反应器温度控制在平稳的范围。在实际生产中希望能够将反应器温度较好的控制在一个最优值, 因为这对聚合物的立构规整度有较大影响。

2 聚丙烯反应器自适应控制系统结构及原理

根据聚丙烯反应器聚合反应温度被控过程的特点, 设计基于 Smith 预估补偿的自适应控制系统, 通过设计一个自适应律, 采用量测的被控对象的输入、状态、输出和跟踪误差等信息, 在线调整反馈控制器的参数, 可以在某种意义上达到控制器设计的预期目标。对于自适应控制系统, 设计控制器的关键是设计自适应律和可调参数控制器。

聚丙烯反应器聚合过程是一个高阶的、非线性的系统, 如果能够用一阶系统逼近高阶系统, 那么采用自适应控制方法就能够实现。依照 Dallin 算法, 将系统高阶简化为一阶加纯滞后^[10], 这样参考模型结构具备了标准化的条件, 并且假定参考模型是线性的时不变系统, 广义误差也是可测的, 那么再应用自适应控制方法求解自适应律就简单了。

自适应律的设计方法主要有基于参数估计和基于稳定性理论的方法。基于局部参数最优化是应用较早的设计方

法, 其主要的问题是不能保证所设计的自适应控制系统总是全局渐近稳定的, 该方法需要对系统进行稳定性判断, 以确保广义误差 e 在闭环回路中能收敛于某一允许的数值。

对反应器温度串级控制系统来说, 我们将副回路循环夹套水温度作为一个被辨识的过程, 广义误差 e 利用自适应辨识器在线整定 Smith 预估器, 使 Smith 预估器的动态性能尽可能的接近副被控对象。在系统的主回路根据系统期望的性能指标设置一个参考模型, 主被控对象即反应器温度的特性由于工况变化或干扰影响发生变化时, 自适应机构通过对可调参数调整, 补偿这些变化, 从而逐步使得参考模型和主被控对象之间的广义误差所构成的性能指标接近最小值。这里我们利用“MIT”方法, 考虑具有一个可调增益的模型参考自适应控制, 系统结构如图 1 所示。

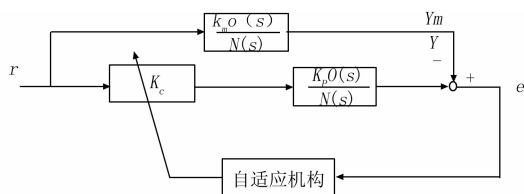


图 1 MIT 自适应控制框图

如图 1 所示, 假定被控对象的传递函数为:

$$Gp(s) = Kp \frac{Q(s)}{N(s)} \quad (1)$$

其中: K_p 为被控对象的增益, $Q(s)$ 和 $N(s)$ 为已知的常数多项式。系统参数发生变化或者受到干扰影响时, 增益 K_p 与参考模型的动态特性之间就会存在偏离, 由于 K_p 不可测, 对于 K_p 漂移所产生的问题, 增加一个可调增益 K_c 进行补偿, 期望 $K_p K_c$ 的乘积与模型的增益 K_m 始终一致。这里我们构造一个期望的参考模型的传递函数, 增益 K_m 是由期望的动态响应确定的常数, 传递函数为:

$$Gm(s) = Km \frac{Q(s)}{N(s)} \quad (2)$$

那么系统的输出广义误差 e 为:

$$e = Y_m - Y \quad (3)$$

其中: e 为理想系统与实际系统响应之间的偏离, Y_m 为理想参考模型输出, Y 为被控对象输出。

确定可调增益 $K_c(t)$ 的自适应调节规律, 使得目标函数的性能指标 J 最小。

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^t e^2(\tau, K_c) d\tau \quad (4)$$

采用梯度法求 $K_c(t)$ 最优控制律, 有:

$$\frac{\partial J}{\partial K_c} = \int_{t_0}^t e \frac{\partial e}{\partial K_c} d\tau \quad (5)$$

根据梯度下降原理, 增益 K_c 的变化量 ΔK_c 应与目标函数 J 的负梯度方向成正比, 即:

$$\Delta K_c = -\mu \frac{\partial J}{\partial K_c} = -\mu \int_{t_0}^t e \frac{\partial e}{\partial K_c} d\tau \quad (6)$$

化时, 系统就会以 $G_m(s)$ 实时整定 $G_1(s)$, 使得 $G_1(s)$ 的输出尽可能的跟踪 $G_m(s)$ 的输出, 使广义误差趋近于零。

3 仿真分析

对于聚丙烯循环反应器温度串级控制系统, 被控变量是反应器温度和循环夹套水温度, 操纵变量是循环夹套水的流量, 根据输入输出的过程辨识得到近似的数学模型如下:

$$\text{主被控对象: } G_{p1}(s) = \frac{1}{18s+1}$$

$$\text{副被控对象: } G_{p2}(s) = \frac{1}{6s+1}e^{-\tau}$$

$$\text{纯滞后时间常数: } \tau = 10 \text{ s}$$

$$\text{设置参考模型: } G_m(s) = \frac{1}{18s+1}$$

副环采用 PI 控制器, 根据参数整定的经验方法, 取控制器最佳整定参数 $K_p = 0.6$, $K_i = 0.09$, 其它参数 $K_1 = 0.12$, $K_2 = 0.09$ 。分别采用常规串级控制和模型参考自适应控制对以上对象进行仿真, 仿真结果如图 4 所示。Smith 自适应控制的效果明显好于常规的串级控制, 超调量减小, 系统的调节时间也缩短。在系统的参数发生变化的时候继续验证控制效果, 分别将纯滞后时间 τ 提高 20%, 将主、副控对象时间常数均提高 50%, 将主、副控对象增益均提高 50% 进行仿真, 仿真结果如图 5~7 所示。

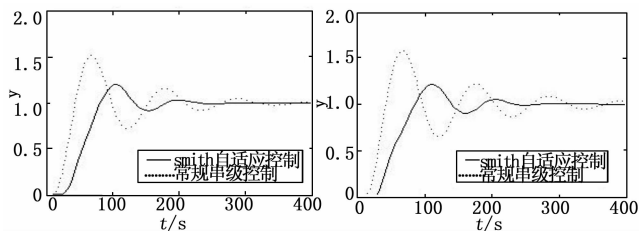


图 4 两种控制方案的比较

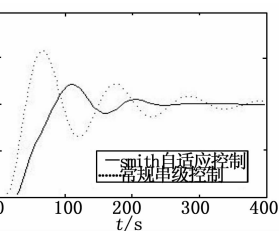


图 5 将纯滞后时间 τ 提高 20% 仿真图

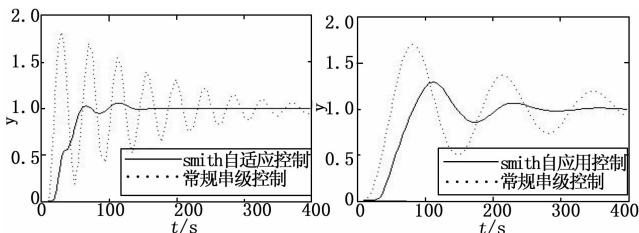


图 6 将主副控对象时间常数提高 50% 仿真图

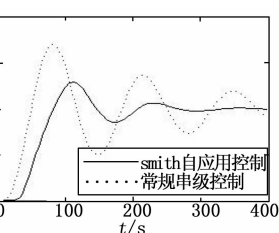


图 7 将主副控对象增益提高 50% 仿真图

根据仿真结果, 将系统的参数变化时系统的动态性能指标汇总在表 1, 通过仿真获得的系统动态响应曲线结合表 1 汇总数据, 可以看出, 采用基于 Smith 预估补偿的自适应控制系统相对常规的串级控制系统, 具有超调量小、对参数变化适应性较好、抗干扰能力相对较强的特点, 相应的

在工程应用中, 执行机构的开合比较平稳, 对夹套水系统的管道应力影响相应较小。

4 结论

本文针对具有时滞的聚丙烯多区循环反应器温度串级控制系统, 讨论了自适应控制的应用问题, 采用一阶惯性环节加纯滞后来逼近高阶系统的方法来设计基于参数估计的自适应控制律, 并证明了系统的稳定性。该算法在一阶系统应用简单易实现, 解决了控制律的物理可实现问题。在副回路引入自适应控制解决了 Smith 预估器与被控对象动态性能不一致的问题, 在主回路引入自适应控制解决了主控对象参数变化对系统的影响。仿真研究表明, 采用 Smith 预估补偿的聚丙烯反应器温度自适应控制系统的控制性能对被控对象参数变化的适应性良好, 相比常规的串级控制系统具有一定的优势, 且在实际生产过程中也是易实现的。仿真结果表明该方法对于解决这类问题是行之有效的。

表 1 参数变化时的系统动态性能指标

	初始参数	τ 提高 20%	T 提高 50%	K 提高 50%
常规串级控制	$\sigma\% = 50\%$ $t_s = 350 \text{ s}$	$\sigma\% = 57\%$ $t_s = 370 \text{ s}$	$\sigma\% = 62\%$ $t_s = 500 \text{ s}$	$\sigma\% = 67\%$ $t_s = 480 \text{ s}$
Smith 自适应控制	$\sigma\% = 15\%$ $t_s = 195 \text{ s}$	$\sigma\% = 20\%$ $t_s = 220 \text{ s}$	$\sigma\% = 22\%$ $t_s = 300 \text{ s}$	$\sigma\% = 6\%$ $t_s = 130 \text{ s}$

参考文献:

- [1] 胡伟, 耿亚珂. 改进滑模观测器的 BLDCM 无模型自适应控制 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016 (3): 456-464.
- [2] 秦天牧, 吕游, 杨婷婷, 等. SCR 烟气脱硝系统自适应混合动态模型 [J]. 仪器仪表学报, 2016 (12): 2844-2850.
- [3] 张丽香, 陈凤兰. 自适应 Smith 预估补偿的过热汽温控制系统 [J]. 信息与控制, 2015 (5): 513-518.
- [4] 刘川来, 杨朋飞, 宁通. 纯滞后串级控制系统的新型控制算法 [J]. 信息与控制, 2009 (2): 248-248.
- [5] 马思思, 何建忠, 刘涛. 云雾室串级模糊自适应 PID 控制研究及实现 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 33: 217-221.
- [6] 王玉华, 郑晓健. 基于模型参考自适应 PID 的高压釜温度控制 [J]. 计算机测量与控制, 2017 (5): 105-108.
- [7] 陶洪峰, 张华, 等. 自抗扰控制器在聚丙烯反应釜中的应用 [J]. 控制工程, 2013 (6): 1042-1044.
- [8] 许刚, 段广仁. 一阶伪线性系统的模型参考输出跟踪控制 [J]. 控制与决策, 2017 (8): 1409-1414.
- [9] 陈秋霞, 俞立, 黄骅. 基于 RVM 的非线性预测控制及在聚丙烯牌号切换中的应用 [J]. 控制与决策, 2010 (8): 1241-1245.
- [10] 胡春花. 控制系统中高阶系统的简化 [J]. 陕西理工学院学报 (自然科学版), 2007 (1): 84-86.