

基于 PCS7 的聚合反应器温度复合控制系统设计

杨勇, 张菁, 钱潇潇, 尹腾飞, 徐鹏飞

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 针对聚合反应器温度存在的非线性、滞后性、耦合性等问题, 并在对聚合物反应工艺流程、控制需求以及控制对象特性研究分析的基础上, 设计了一种模糊 PID 控制与冷热水变比例多阀位开度控制的双模式分段温度复合控制方法, 通过 PCS7 过程控制系统提供的结构化语言 SCL 编写控制器模块, 连续功能控制图 CFC 搭建温度系统控制回路, 顺序功能图 SFC 设定控制流程, 结合高级多功能过程与控制仿真设备 (SMPT-1000) 实现了控制方案, 并与传统 PID 的温度控制效果进行对比; 经试验测试结果表明该复合控制方案比传统 PID 控制超调量低, 具有更优越的稳态性能和更快的响应速度以及较高的能量利用效率, 提高了反应器温度控制性能。

关键词: 反应器温度; 模糊 PID; 变比例多阀位控制; 复合控制; PCS7

Polymer Reactor Temperature Compound Control System Design Based on PCS7

Yang Yong, Zhang Jing, Qian Xiaoxiao, Yin Tengfei, Xu Pengfei

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the problems of non-linearity, hysteresis, and coupling of polymerization reactor temperature, and based on the research and analysis of polymer reaction process flow, control requirements, and control object characteristics, a fuzzy PID control and cold and hot water were used. Multi-valve opening control of variable ratio dual-mode segmented temperature compound control method, through the PCS7 process control system to provide a structured language SCL programming controller module, continuous function control chart CFC temperature control system to build the control loop, SFC set up the sequence diagram. The control process was set up, and the control program was implemented in combination with the advanced multi-function process and control simulation device (SMPT-1000), and compared with the traditional PID temperature control effect. The experimental test results show that the composite control scheme has lower overshoot than the traditional PID control. It has superior steady state performance, faster response speed and higher energy utilization efficiency, and improves the reactor temperature control performance.

Keywords: reactor temperature; fuzzy PID; variable ratio multi-valve control; compound control; PCS7

0 引言

聚合反应器是一类常用在塑料、化学纤维、合成橡胶三大合成材料生产中的极为重要的化工设备^[1-3]。由于其内部的化学反应机理非常复杂, 因此以数学方法对控制对象建立精确模型十分困难。而且反应放热剧烈, 传热效果不理想, 因此反应器温度控制具有非线性、大时滞性以及强耦合性等特点, 一直是工业控制领域的难点。

目前化工自动化控制仍然以 PID 控制方法为主流, 但对于非线性、时变不确定性系统, 由于过程模型难以确立,

存在参数难以调整, 超调量过大, 抗干扰能力弱, 适应性差等缺点, 导致控制效果不佳^[4]。针对 PID 控制存在的问题, 相关学者相继提出了一些先进智能的 PID 控制方法, 如非线性 PID 优化控制, 神经网络 PID 控制等。

本文在分析工业生产工艺流程和控制需求及特性的基础上, 一方面考虑到液位与温度存在的耦合性, 采用液位进料比值控制, 另一方面在 PID 控制的基础上, 利用模糊 PID 算法优越的动、静态性能, 控制精度准确的优势, 并结合专家控制调节迅速、平稳、灵活性的优点, 设计了模糊 PID 控制与冷热水变比例多阀位开度控制的复合温度控制策略, 并通过 PCS7 构建控制回路和设定控制流程, 结合 SMPT-1000 中的聚合反应器子平台进行了控制系统的实验验证, 有效改善温度控制中的非线性、时滞性、耦合性等问题, 提高温度控制系统的品质特性。

1 工艺流程及控制特性分析

所选被控对象为工业生产中常见的连续反应过程。物料 A, B 的入口流量分别由进料阀 FV1101 和 FV1102 控制,

收稿日期: 2018-05-13; 修回日期: 2018-05-23。

基金项目: 2016 级上海工程技术大学研究生科研创新项目 (F3-0903-17-01047)。

作者简介: 杨勇 (1994-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事工业自动化、控制理论及方法、控制检测技术及应用方向的研究。

张菁 (1969-), 女, 上海人, 硕士生导师, 副教授, 主要从事电气工程及其自动化、工业自动化、控制理论及方法的研究。

催化剂 C 入口流量由控制阀 FV1103 控制并与物料 A, B 按一定比例进入反应器混合进行强烈的放热反应, 生成稀液产物 D, 出口产物由出料阀 FV1105 控制并由其送至下游生产工序做进一步分离提纯, 以备循环使用。夹套式冷却水流量由调节阀 FV1201 控制, 冷却水吸收反应器的放热量形成热水, 一部分经控制阀 FV1202 作为回收热水进入预热器为反应预热, 另一部分经控制阀 FV1203 排放至公用工程。图 1 为反应器 R101 工艺流程, 图中 TI1103 和 LI1102 分别为反应器温度和液位的监测量。

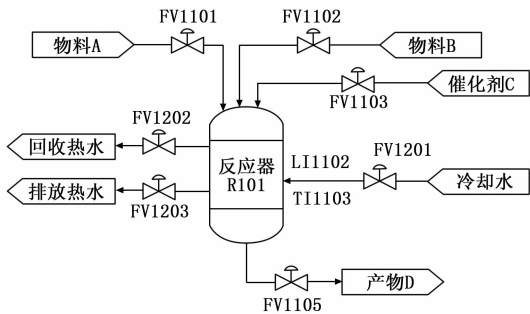


图 1 反应器工艺流程

反应物进料一方面是聚合反应产品质量的关键, 合适的进料比能增加产物转换率, 从而提高出口产物 D 的浓度, 另一方面为了维持出口物产量的稳定, 必须通过控制进料来控制反应器液位。在物料进入反应器反应的前期, 由于反应器温度还未达到反应最佳温度, 导致反应转换率下降, 影响产物浓度, 所以前期需通过热水对反应物进行预热, 加快反应速率, 提高产物转换率。因为主反应是一个剧烈的放热反应, 属于非自衡的危险过程, 若反应放出的热量无法及时移走, 聚合反应器温度则急剧上升, 伴随着压力飞速上升, 最后导致爆炸事故的发生, 所以在反应过程中需不断通过冷水降温。由于反应器温度又和冷热水流量等影响因素相关, 且反应器的液位及压力均与温度存在耦合性以及温度自身变化导致的滞后性, 所以反应器温度控制是过程控制系统中的关键及难点。

为满足工艺要求以及保证连续反应的安全运行, 针对不同的控制对象设置了不同的稳态和动态控制指标, 反应器 R101 液位控制在 50% (偏差±2%); 反应器的温度控制在 100 度 (偏差±1 度), 在满足工艺要求、系统稳定的前提条件下, 尽量减少能耗, 提高能源的利用率, 所以需对冷却水消耗量, 热水回收量综合考虑, 创造更高的经济效益。反应器液位、温度等与系统安全相关的指标必须全程在允许范围之内, 针对进料中断、反应物溢出、压力过大等反应器可能发生的事故要进行故障识别, 使系统能够满足正常生产的安全要求。

2 系统设计

2.1 液位进料比值控制

反应器液位 LI1102 主要受物料 A、物料 B 以及催化剂 C 的进料流量以及产物 D 的出口流量影响, 考虑到反应物

出口阀 FV1105 控制的出口流量的波动除了会导致液位变化, 还会影响进料流量的改变, 所以在此选择 FV1101 作为执行器来控制液位。由于产物浓度需求, 反应物和催化剂需要一定比例, 所以设计了双闭环比值控制回路, 将 FV1101 的检测流量分别经过乘法器 B 和 C 的数值运算作为物料 B 和催化剂 C 控制回路的设定值, 并通过 FV1102 和 FV1103 调节。如图 2 所示。

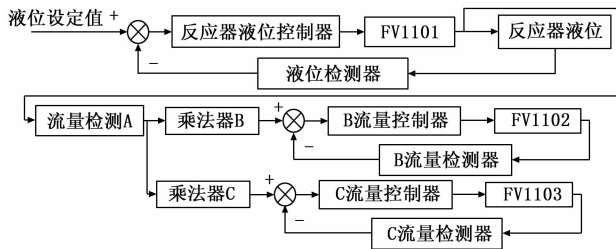


图 2 液位进料比值控制

2.2 温度控制系统设计

该工艺过程除了需要精确的稳态工艺指标和动态工艺指标范围外, 还要克服系统可能存在的干扰, 为提高温度控制性能, 避免过高或过快升温导致反应器压力飞升而爆炸, 保证系统的稳定运行。本设计将采用模糊 PID 控制与专家控制的理论分别设计不同反应阶段的温度控制策略, 在被控变量的主要上升阶段采用基于专家控制理论的冷热水变比例多阀位开度控制法, 当温度接近稳定值附近时, 切换至模糊 PID 控制, 通过此方法使温度控制达到高精度、快响应、鲁棒性高、动静态性能优越的控制效果。整体控制框图如图 3 所示。将温度设定值与温度传感器检测的当前值比较, 以系统反馈的偏差大小 e 来决定控制方式的切换状态。图中 K_1 、 K_2 分别为模糊 PID 自整定控制和冷热水变比例多阀位开度控制的模式开关, 执行机构为气动阀。

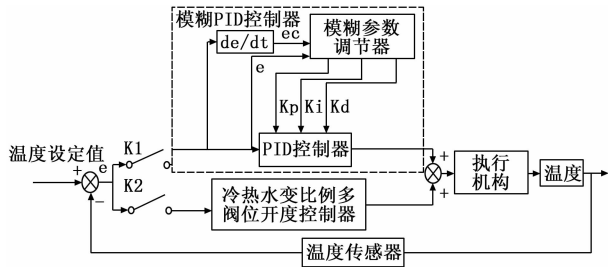


图 3 双模式控制原理图

2.3 模糊 PID 控制

设计选用二维模糊控制器对反应器温度进行控制, 以系统检测的误差 e 以及误差变化率 ec 作为输入量, 通过模糊参数调节器实时在线调整, 输出满足不同时刻的 e 和 ec 对应的 PID 参数。

根据实际状况, 这里将 e 、 ec 以及输出 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的模糊论域定义为 $[-6, 6]$ 。量化因子分别取 1, 0.6, 0.1, 0.01, 0.083, 同时定义了它们的模糊子集都为 $[NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB]$, 其中 NB 表示负大, NM

表 1 模糊规则表

		e						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ec	NB	PM/ZO/PS	PS/PS/PB	PM/PM/PB	PM/PB/PS	PM/PM/PS	PS/PS/PB	PM/ZO/PB
	NM	PB/ZO/PS	PM/PS/PS	PB/PB/PM	PB/PB/PM	PB/PB/ZO	PM/PS/PS	PS/ZO/PS
	NS	PB/ZO/PS	PM/ZO/ZO	PB/PB/ZO	PB/PB/PS	PB/PB/PM	PM/ZO/ZO	PS/ZO/PS
	ZO	PB/ZO/PB	PM/ZO/PB	PB/PB/PS	ZO/PB/PS	PB/PB/PS	PM/ZO/PS	PS/ZO/ZO
	PS	PB/ZO/ZO	PM/ZO/PS	PB/PB/PM	PB/PB/ZO	PB/PB/PS	PM/ZO/PS	PS/ZO/PS
	PM	PB/ZO/PS	PM/PS/PS	PB/PB/PS	PB/PB/PS	PB/PB/PS	PM/PS/PM	PS/ZO/PS
	PB	PM/ZO/PB	PS/PS/PB	PM/PM/PS	PM/PB/PS	PM/PM/PB	PS/PS/PB	PM/ZO/PS

表示负中, NS 表示负小, ZO 表示零, PS 表示正小, PM 表示正中, PB 表示正大。常见隶属度函数的表现形式有三角形型、高斯型、梯形, 但不同类型的隶属函数对控制器的性能影响并不大, 主要是量化因子的影响。这里采用的是三角形隶属度函数, 如图 4 所示。

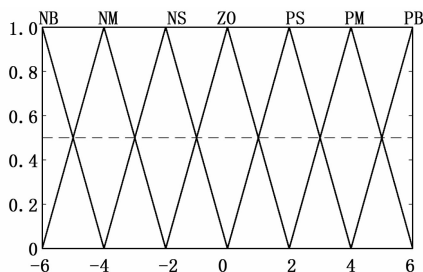


图 4 隶属度函数

根据 PID 参数自整定调节经验以及实际实验测试分析进行推导, 得到 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的模糊规则表, 如表 1 所示。

模糊化后的控制量属于模糊集合量化论域, 不能直接作用被控对象, 所以实际输出量应为比例因子与量化值的乘积。本设计通过重心法解模糊, 最后得到系统运行时 PID 参数的调整式为:

$$K_p = K'_p + a_p \Delta K_p \tag{1}$$

$$K_i = K'_i + a_i \Delta K_i \tag{2}$$

$$K_d = K'_d + a_d \Delta K_d \tag{3}$$

其中: a_p, a_i, a_d 为比例因子, K_p, K_i, K_d 为 PID 的 3 个控制参数, K'_p, K'_i, K'_d 分别为模糊 PID 的初始参数。通过上机实验, 测得 K'_p, K'_i, K'_d 分别为 250, 20, 6, 比例因子分别取 0.1, 0.1, 0.75。

2.4 冷热水变比例多阀位开度控制

冷热水变比例多阀位开度法即依据专家控制理论设计控制器调节阀门输出流量, 满足工艺上冷却和加热的不同需求, 从而达到温度控制的效果。根据各种有关对温度控制经验知识的获取, 形成知识库, 推理机在其基础上采用推理方式进行总结, 产生不同规则实现对被控对象的控制。本控制方案采用表现形式为: if [条件] then [操作和结论] 的模糊产生式规则。推理机采用正向推理方式以此提高系统的响应速度^[9-8]。由于不同阶段的反应温度上升的速

率存在较大差别, 具体可以分为以下几个阶段进行分段控温, 如表 2 所示。

表 2 温度反应分段表 $^{\circ}\text{C}$

反应阶段	反应器温度
1	20~50
2	50~65
3	65~94
4	94~105

根据反应温度在不同的阶段, 按温度检测值与设定值的比较, 采取不同的阀位控制规则和参数作为输出, 达到温度平稳快速控制, 提高水能源利用效率的目的。经过实验探索, 控制过程中出现的情况如下: 当 T 在 1 阶段时冷水不动作; 当 T 在 2 和 3 阶段时反应剧烈放热, 应增大冷水控制量输出, 逐渐减小热量, 使得温度平缓上升, 同时做到能量最大程度的回收; 当 T 在阶段 4 时反应趋近平稳, 此时适当控制冷热水阀, 避免温度上升速率过慢或达不到稳定值。例如当 T 处于阶段 3 时, 可编写如下控制规则集: 规则 1: if $T < S_p$ then $U_1 = K_1 * U_{i1}$ and $U_2 = K_2 * U_{i2}$; 规则 2: if $T = S_p$ or $(T - S_p) \leq A$ or $(T - S_p) > A$ then $U_1 = U_{i1}$ and $U_2 = U_{i2}$; 规则 3: if $T > S_p$ then $U_1 = K_3 * U_{i1}$ and $U_2 = K_4 * U_{i2}$ 。其中, T 为温度测量值, S_p 为温度设定值, U_1 为冷水阀控制量, U_2 为回收热水阀控制量, A 为常量 (通常为稳态误差值), K_1, K_2, K_3, K_4 为参考比例系数, U_{i1} 和 U_{i2} 分别为初始阀位控制量。

3 系统配置

3.1 系统硬件设计

本控制方案由西门子 PCS7 过程控制系统来实现, 它是一种模块化的基于现场总线的新一代过程控制系统, 将传统的集散控制系统 DCS 的优点与可编程逻辑控制器 PLC 相结合, 可以根据需要选用不同的功能组件进行系统组态^[9-10]。采用 SMPT-1000 的反应罐, 阀门, 预热罐等组成工业连续过程, 选择西门子 S7-400 系列 CPU 412-3 作为过程系统控制器, 并通过现场总线 Profibus-DP 与 ET200M 连接、上位机与控制器通过工业以太网 Profinet 的连接实现现场信息采集和系统通信, SMPT-1000 的通信接口与从站 ET-200M 的 I/O 模块相连, 接收通信标准为 4

-20 mA 的信号。系统硬件配置如图 5 所示。

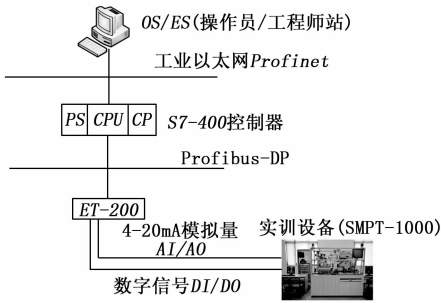


图 5 系统硬件配置

3.2 系统软件设计

软件控制方案主要采用 PCS7 提供的连续功能图 CFC 搭建控制回路，顺序功能图 SFC 来设定控制流程。以反应器温度控制方案为例，通过 PCS7 系统提供的结构化语言 (SCL) 编写创建所需的模糊控制功能块 FuzzyConL 和冷热水变比例多阀位开度控制块 ExpConL，并与模拟输入输出模块 Pcs7AnIn 和 Pcs7AnOu、PID 模块 TIC1103 连接构成温度控制回路，如图 6 所示。在组态软件上将温度测量传感器的 IO 地址与模拟量输入模块的 PV_IN 管脚相连，将模拟信号转化成数字信号后由 PV_OUT 输出送入控制器 TIC1103 的测量值 PV 和编写的程序块的温度设定值 TEMP_SP 管脚，控制器及 TIC1103 的输出值由 MV、EXP_MV1、EXP_MV1 管脚输送给模拟量输出模块 FV1202、FV1203 的 PV_IN，将数字信号转换成模拟信号后由 PV_OUT 管脚输出给气动阀的 IO 地址并动作。考虑到无扰切换的问题，在组态时控制器的输出要跟踪回路的给定值，将 MV 与 MV_Trk 相连，防止设定值跳变。

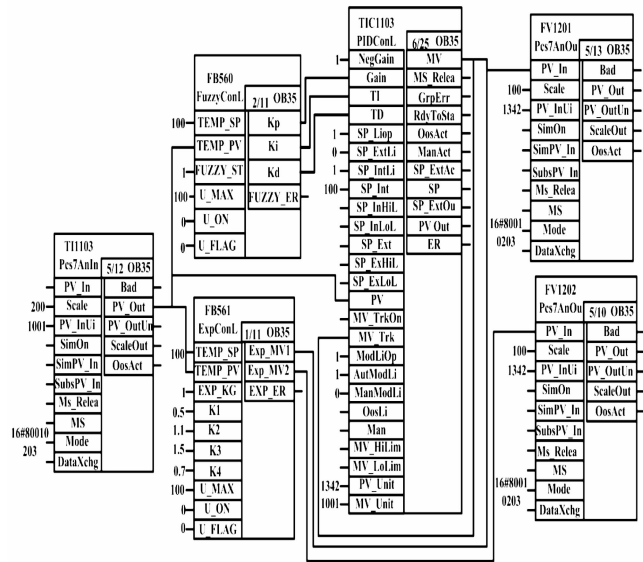


图 6 双模式控制 CFC

SFC 是一种具有逐步序列的顺序控制系统，通过条件的判断实现控制状态到另一状态的转变^[11]。顺序控制流程如图 7 所示。首先需对所有阀门开度进行初始化，考虑到

初始反应转化率较低，所以前期通过 FV1101 小股进料保证反应物与催化剂反应充分，同时剧烈放热提供所需最佳反应环境温度，提高组分浓度，等液位达到一定值后，切换为自动控制并开启出口阀门，温度需与液位同时控制维持系统稳定，考虑到温度的滞后性，应提前设定模式控制温度点，其中 EXP_KG 和 FUZZY_ST 为控制模式开关，为 1 表示开启。

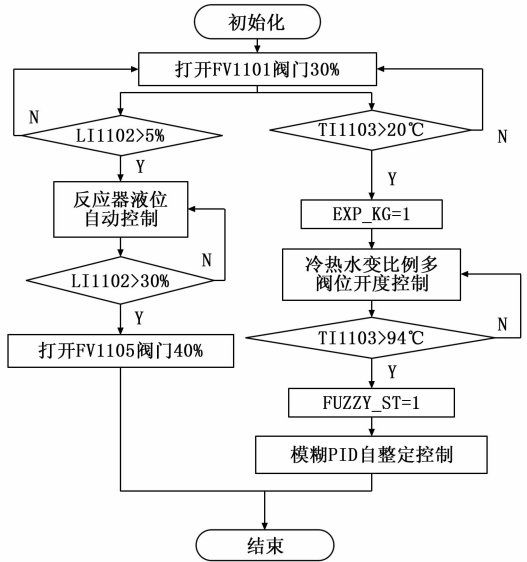


图 7 顺序控制 SFC

4 实验结果与分析

将温度设定值设为 100℃，利用 PCS7 获取实验数据，绘制响应曲线并与传统 PID 控制的实验结果进行对比，如图 8 所示。控制效果对比如表 3 所示。

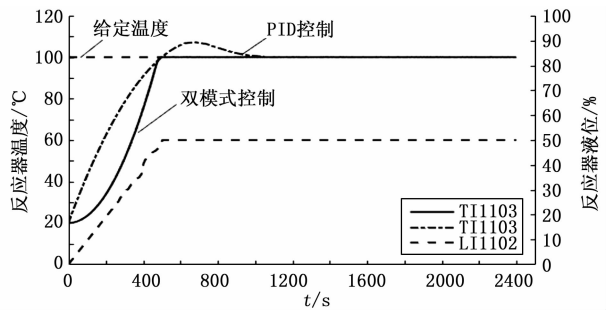


图 8 实验曲线图

表 3 效果指标对照表

	PID 控制	双模式控制
稳态值/℃	100.190	100.068
调节时间/s	317.000	89.000
超调量/%	7.125	0.031
冷水用量/kg	43 565.890	21 215.710
热水回收量/kg	3 125.640	13 249.550