

基于前馈 - 自抗扰算法的换热器动态试验 温度控制研究

武桐言¹, 李亚煜², 王 亮¹, 万江文³

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083; 2. 中国船舶集团有限公司 704 研究所, 上海 201100;
3. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了使换热器试验测控系统满足动态换热试验中对温度控制的要求, 分析了试验系统中被控温度对象动态模型, 设计了前馈 - 自抗扰温度控制算法。动态换热试验对象为管壳式换热器, 试验过程管程流体为强迫对流换热, 壳程流体自然对流换热, 同时管程流体循环利用, 要求控制管程入口温度稳定。控制算法全面利用模型信息, 将壳程温度作为管程温度控制中的干扰, 为其设计前馈补偿, 同时设计自抗扰控制算法, 处理模型偏差问题。利用 AMESim 软件搭建系统模型, 在 Simulink 中设计控制算法, 进行了 AMESim/Simulink 联合仿真, 通过对比多种控制算法, 验证了在壳程温度变化干扰的换热过程中, 使用前馈 - 自抗扰控制算法能够使管程入口温度波动更小, 更快达到稳定。

关 键 词: 管壳式换热器; 动态换热过程; 温度控制; 前馈控制; 自抗扰控制

中图分类号: TK221 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2022.08.011

[引用本文格式] 武桐言, 李亚煜, 王 亮, 等. 基于前馈 - 自抗扰算法的换热器动态试验温度控制研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(8): 83-90. WU Tong-yan, LI Ya-yu, WANG Liang, et al. Study on dynamic test temperature control of heat exchanger based on feedforward-active disturbance rejection algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 83-90.

Study on Dynamic Test Temperature Control of Heat Exchanger based on Feedforward-Active Disturbance Rejection Algorithm

WU Tong-yan¹, LI Ya-yu², WANG Liang¹, WAN Jiang-wen³

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing, China, Post Code: 100083;
2. No. 704 Research Institute of CSSC, Shanghai, Post Code: 201100; 3. School of Instrument Science and
Opto-electronic Engineering, Beihang University, Beijing, China, Post Code: 100083)

Abstract: In order to meet the temperature parameter control requirements of the heat exchanger test measurement and control system in the dynamic heat transfer test, the dynamic model of the controlled temperature object in the test system is analyzed, and a feedforward-active disturbance rejection control algorithm for temperature is designed. The dynamic heat transfer test object is a shell-and-tube heat exchanger. The test process is heat transfer for forced convection of the fluid in the tube side and natural convection of the fluid in the shell side. During the test, the fluid in the tube side is recycled, and the inlet temperature of the tube side is required to be stable. The control algorithm makes full use of the model information, uses the shell side temperature as the tube side temperature interference to design feedforward compensation for it. At the same time, the active disturbance rejection control algorithm is designed to deal with the model deviation problem. The system model is built by using AMESim software, and a control algorithm is designed by Simulink, so as to conduct the joint simulation for AMESim/Simulink. By comparing with a variety of control algorithms, it can be found that in the heat transfer process of shell side temperature change interference, the use of feedforward-active disturbance rejection control al-

gorithm can make the tube side inlet temperature fluctuation become smaller and achieve stability faster.

Key words: shell and tube heat exchanger, dynamic heat transfer process, temperature control, feedforward control, active disturbance rejection control

引 言

换热器作为工业生产过程中的常用设备,主要用于不同介质之间的热量交换和传递。工程上对换热器性能的评定主要包括两个方面:换热器的传热特性和流阻特性^[1]。国内外已有相对完善的换热器标准与性能测试资料^[2-4],这些资料大多面向的是稳态换热过程,而对于某些特殊实际过程所涉及的瞬态换热过程,并没有较为统一和明确的性能测试标准。瞬态换热过程中,换热器内部流体一般处于非平衡的动态,这与稳态热平衡中的换热过程差别较大。此外,对于温度控制来说,控制对象存在容量滞后大的特点,国内外学者对于温度控制设计了各种控制算法。Vasanthi 等人^[5]设计了包含前馈控制的自整定串级自适应控制器;李盛伟等人^[6]针对相变储能电锅炉的温度控制设计了串级 PID 控制器。近年来,自抗扰技术以其简洁、可靠的性能在工业过程中被广泛应用^[7-8]。

本文从某换热器实际应用出发,以换热器动态试验测控系统为研究对象,对换热过程中换热器的温度控制进行研究和设计。结合近年来工业控制研究中出现的新算法,提出了适用于换热器动态换热试验测控系统中温度控制任务的前馈-自抗扰新算法,该算法具有提前补偿干扰的功能,能在模型存在不确定干扰的情况下实现稳定的闭环控制。

1 系统介绍

1.1 换热试验测控系统

根据换热器实际使用工况,设计了适用于多种工况的换热器动态换热试验测控系统。该系统由管程、壳程两个流体回路组成,壳程为热流体,管程为冷流体,壳程和管程回路工艺简图如图 1 和图 2 所示。

在换热器管程、壳程的出、入口均安装了流量、温度、压力传感器,试验过程中记录各传感器数据,用于后续对换热器性能的计算及控制回路的设计;

闸阀用于对回路进行切换;量热储罐用于对试验后壳程流体进行回收。

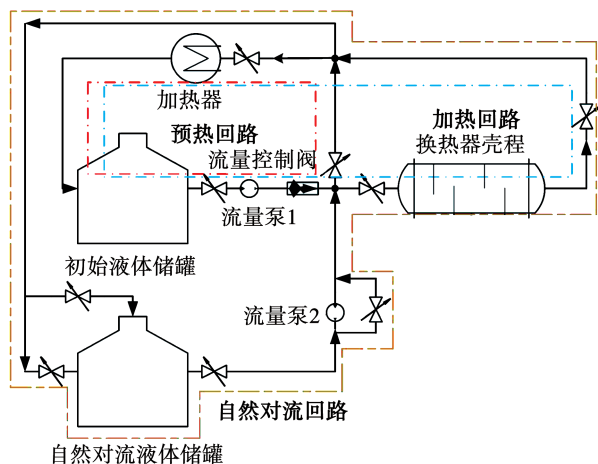


图 1 壳程回路工艺简图

Fig. 1 Shell side circuit structure diagram

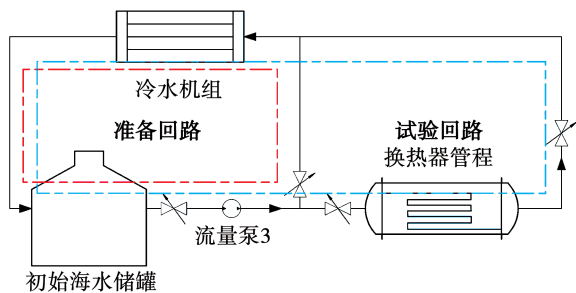


图 2 管程回路工艺简图

Fig. 2 Tube side circuit structure diagram

1.2 试验工况

本研究主要针对特定动态换热工况过程,该过程为:壳程中以水乙二醇作为热流体静止于回路中,初始温度为 $54\text{ }^{\circ}\text{C}$;管程中以海水作为冷流体,循环流动,流量恒定为 $35\text{ m}^3/\text{h}$,入口温度恒定控制在 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$;管壳式换热器壳程容积为 1 m^3 ,其中自然对流换热的水乙二醇参与换热总体积(与储罐连通)为 2.4 m^3 。假设壳程内水乙二醇初始温度均匀,记录换热过程中的各传感器数据,用于后续计算性能。在试验过程,要求控制管程入口温度尽快稳定于设定温度 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内。

2 换热过程温度模型

2.1 壳程自然对流换热模型

试验过程中,壳程流体流动形成自然对流,直接参与换热器换热的水乙二醇量为 1 m^3 ,要求参与自然对流的水乙二醇量为 2.4 m^3 ,为了满足自然对流换热液体量,要求在自然对流液体储罐中有额外 1.4 m^3 水乙二醇,这部分水乙二醇在试验中通过自然对流与换热器内部 1 m^3 水乙二醇共同参与换热过程。通过设置安装高度差,使储罐中 1.4 m^3 液位高于换热器最高位置,实现自然对流回路开启后,储罐中 1.4 m^3 液体与换热器内 1 m^3 液体能够进行自然对流。自然对流换热过程较为复杂,该部分模拟过程仅用于了解工况 2 换热过程中管、壳程温度的一般变化趋势,因此参考文献[9-10]中有关有限空间自然对流换热的分析方法,计算对流换热的传热系数。首先,采用格拉晓夫准则计算壳程流体的格拉晓夫数 Gr :

$$Gr = \frac{g\beta\delta^2(T_1 - T_2)}{\nu^2} \quad (1)$$

式中: g —重力加速度; β —壳程流体的体积膨胀系数; δ —特征长度; T_1 —热流体温度; T_2 —冷流体温度的温差; ν —运动粘度。

为了便于分析,采用集总参数法对壳程进行简化,取热流体温度 $T_1 = 327.15 \text{ K}$,冷流体温度 $T_2 = 305.15 \text{ K}$,特征长度理论最大值为壳程挡板间距离取 $\delta = 554 \text{ mm}$ 。根据 T_1 和 T_2 计算特征温度为 316.15 K 。得到该温度下水乙二醇的运动粘度为 $\nu = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$,普朗特数 $Pr = 12.983$ 。根据 T_1, T_2 温度下对应的体积膨胀系数求得格拉晓夫数为 $Gr = 1.28 \times 10^4$ 。代入文献[9]中的试验关联式得到努塞尔数 Nu_m :

$$Nu_m = 0.59 (Gr \cdot Pr)^{1/4} \quad (2)$$

对流换热系数 K :

$$K = \frac{Nu_m \cdot \lambda}{\delta} \quad (3)$$

为了简化自然对流换热动态过程建模,假设壳程自然对流流体被均匀加热,且在整个试验过程中,壳程流体内部温差较小。此时可以将壳程自然对流流体看作固体,采用集总参数法研究整体壳程的热

量变化,建立热量传递方程:

$$c_h \rho_h V_h \frac{dT_h}{dt} = -KA_0(T_h - T_c) \quad (4)$$

式中: c_h —壳程流体比热容; ρ_h —壳程流体液体密度; V_h —壳程流体体积; T_h —壳程流体温度,是一个随时间变化的函数; K —传热系数; A_0 —传热面积; T_c —管程冷流体入口温度。

随着试验进行,控制器会控制管程入口温度 T_c 恒定,因此最终可变的 T_h 也会被冷却至与 T_c 相等,那么设定过余温度 $\theta = T_h - T_c$ 。根据特定动态换热工况要求,壳程水乙二醇初始温度 $T_{h0} = 327.15 \text{ K}$,管程海水温度恒定为 $T_{c0} = T_c = 305.15 \text{ K}$,初始状态 $\theta_0 = T_{h0} - T_{c0}$,对式(4)的时间 t 时刻进行不定积分,得到壳程温度变化函数:

$$\theta = \theta_0 \exp\left(-\frac{K_2 A_0 t}{c_h \rho_h V_h}\right) \quad (5)$$

该函数形式为指数衰减形式,且此处假设管程入口温度、流量不发生变化。

2.2 管程强迫对流换热模型

特定的动态换热工况要求管程流体以恒定流速、恒定温度进入换热器。针对换热器强迫对流换热过程的研究,多采用动态热平衡方程^[11],假设壳程内部温差可忽略,试验过程中管程流体动态热平衡方程为:

$$\rho_c V_c c_c \frac{dT_{c,out}}{dt} = q_c c_c (T_{c,in} - T_{c,out}) + K_0 A_0 T_h \quad (6)$$

式中: c_c —管程流体比热容; ρ_c —管程流体液体密度; V_c —管程流体体积; K_0 —平均传热系数; $T_{c,in}$ —管程流体入口温度; $T_{c,out}$ —管程冷流体出口温度。

通过在工作点处进行泰勒级数展开,保留一次项,可得到增量式结果:

$$\frac{d\Delta T_{c,out}}{dt} = \frac{q_c}{\rho_c V_c} \Delta T_{c,in} - \left(\frac{q_c}{\rho_c V_c} + \frac{K_0 A_0}{\rho_c V_c c_c}\right) \Delta T_{c,out} + \frac{K_0 A_0}{\rho_c V_c c_c} \Delta T_h \quad (7)$$

从式(7)中可以得到壳程温度-管程出口温度传递函数关系 G_{hc} 为:

$$G_{hc} = \frac{T_{c,out}}{T_h} = \frac{K_0 A_0}{\rho_c V_c c_c \left(s + \frac{q_c}{\rho_c V_c} + \frac{K_0 A_0}{\rho_c V_c c_c}\right)} \quad (8)$$

为了进一步研究该过程,采用 AMESim 软件根据实际设备参数搭建了仿真模型^[12]。在该部分仿真中,管程流体不形成回流,设定管程入口为恒定温度、恒定流量,观察管程出口温度变化情况。

仿真程序的主要思路是对换热器换热过程进行模拟。壳程部分为含有 2.4 m^3 流体的储罐,管程部分为单侧换热器结构,换热器参数与实际参数一致。管程、壳程连通部分通过设置中间材料介质实现热量交换,暂不考虑管程回流环节与执行环节,设定工况要求的初始条件后,换热过程中管程出口温度、壳程温度仿真结果如图 3 所示。

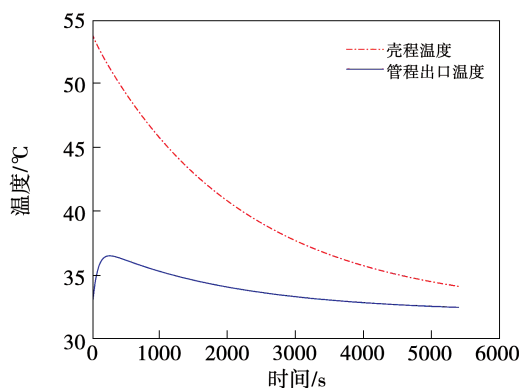


图 3 换热过程温度变化曲线

Fig. 3 Temperature change curve during heat transfer

分析上述换热过程仿真结果,可以发现:(1) 壳程温度变化符合式(5)所示的指数衰减形式,证明了 2.1 部分分析的合理性;(2) 壳程温度对管程温度的干扰在换热开始最大,之后逐渐减小,且该干扰信号变化规律经理论推导近似为式(5),同时干扰信号,即壳程温度在系统中可测;(3) 仿真中管程流体为开环系统,仅用来分析换热过程,还未考虑对回流到管程入口流体的温度控制,因此需要考虑回流环节并设计温度控制算法;(4) 在控制初期就存在的时变干扰很难使用传统 PID 控制,因为控制参数很难整定。

3 基于前馈-自抗扰算法的温度控制

3.1 自抗扰控制算法

自抗扰控制(ADRC)的核心思想是设定串联积分结构为标准型,把除此之外的误差设为总扰动,该

扰动包括外部扰动和模型内部不确定变化。设计扩张状态观测器对总扰动进行估计,并在控制算法中予以消除。该算法既保留了 PID 不依赖模型的特点,又能够对干扰进行估计并补偿,具有较好的抗干扰能力。完整的 ADRC 还包括用于安排过渡过程和微分估计的跟踪微分器、用于估计系统状态和干扰的扩张状态观测器、用于计算控制量的非线性状态误差反馈^[13]。

实际应用的微分跟踪器形式为:

$$\begin{cases} f_h = \text{fhan}(\gamma_1(k) - \gamma(k), \gamma_2(k), r_0, h_0) \\ \gamma_1(k+1) = \gamma_1(k) + h_0 \gamma_2(k) \\ \gamma_2(k+1) = \gamma_2(k) + h_0 f_h \\ d = r_0 h_0^2 \\ a_0 = h_0 \gamma_2 \\ \lambda = \gamma_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(d+8|\lambda|)} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(\lambda)(a_1 - d)/2 \\ s_\lambda = [\text{sign}(\lambda + d) - \text{sign}(\lambda - d)]/2 \\ a = (a_0 + \lambda - a_2)s_\lambda + a_2 \\ s_a = [\text{sign}(a + d) - \text{sign}(a - d)]/2 \\ \text{fhan}(\gamma_1, \gamma_2, r_0, h_0) = -r_0[a/d - \text{sign}(a)]s_a - r_0 \text{sign}(a) \end{cases} \quad (9)$$

(10)

式中: γ —原设定值; γ_1 —安排后的待跟踪值, γ_2 —估计的待跟踪值微分,该部分采用估计值为设定值安排一个过渡过程,防止突变对控制的影响; r_0 —速度因子,决定跟踪速度,由系统可接受程度来确定; h_0 —计算步长; fhan —最速综合函数,其作用与二阶临界震荡环节类似,但具有更好的噪声抑制能力^[14]。 f_h 为由 fhan 函数计算得到的估计值微分离散更新量; $d, a_0, a_1, a_2, \lambda, s_\lambda, s_a$ 均为中间参数,用来计算 fhan 的值。

离散的扩张状态观测器形式为:

$$\begin{cases} e = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h_0[z_2(k) - \beta_{01}e(k)] \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h_0[z_3(k) - \beta_{02} \cdot \text{fal}(e, a, h_0) + bu] \\ z_3(k+1) = z_3(k) - h_0\beta_{03} \cdot \text{fal}(e, 0.25, h_0) \end{cases} \quad (11)$$

fal 函数为:

$$\text{fal}(e,a,h_0) = \begin{cases} \frac{e}{h_0^{a-1}}, & |e| < h_0 \\ |e|^a \cdot \text{sign}(e), & |e| \geq h_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: y —系统当前时刻输出; e —观测器估计误差; z_1 —观测器估计输出; z_2 —观测器估计输出的微分; z_3 —观测器估计的总干扰; a —跟踪速度系数,默认取 0.25; $\beta_{01}, \beta_{02}, \beta_{03}$ —观测器参数,与步长、噪声相关,与模型相关性小。

该观测器可以实现在仅采集输入输出而不利用模型信息的情况下对系统状态和干扰进行估计。

非线性状态误差反馈也是在 PID 控制的基础上的变形,以二阶系统为例,所有参数均为 k 时刻对应值,省略 k 后表达式为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} - C \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} \\ u_0 = \text{fhan}(e_1, ce_2, r_1, h_1) \\ u = \frac{u_0 - z_3}{b_0} \end{cases} \quad (13)$$

式中: r_1 —控制量增益; c —阻尼因子; h_1 —精度因子,是 h_0 的整数倍; b_0 —输入矩阵(向量)已知部分,也是控制算法的干扰补偿因子; e_1 —跟踪误差; e_2 —跟踪微分误差。

采用基于步长的幂次形式参数经验公式整定控制参数,该经验公式的特点是仅需要设定算法步长 h 与补偿因子 b_0 ,其他参数均可通过与 h 相关的经验公式进行计算^[14]。自抗扰控制虽然参数众多,但是参数在一定范围内敏感度较低,采用相关的经验公式即可得到可应用的参数组。对于本项目模型来说参数整定比 PID 控制更简单。

3.2 前馈-自抗扰控制算法

前馈控制的核心思想是基于不变性原理,即通过扰动的测量,实现对扰动进行补偿,使被控对象的动态特性保持不变^[15]。该算法的特点是能够在干扰产生之初直接给出控制量,而不是在被控量因干扰产生偏差后进行控制,相较于基于误差的算法有一定超前控制能力。但是该方法在应用过程中存在

的问题有以下两点:(1) 需要专门设计干扰信号的采集设备,且控制精度依赖于对干扰的测量精度而不是被控变量精度;(2) 狭义的前馈控制为开环控制,严重依赖干扰通道模型的准确性,模型偏差带来的影响极大。

管程入口温度控制主要由冷水机组实现,冷水机组工作原理是通过冷却水、冷冻水两侧流体对流换热实现温度控制,管程液体作为冷冻水,额外引入温度较低的海水作为冷冻水,通过控制海水流量实现管程回流温度控制。温度控制作为时间常数较大的对象,基于反馈误差的控制算法对温度的控制速度较慢,因此更需要前馈控制这种具有干扰信号提前补偿的控制算法。分析系统特点可知,系统具有能够进行干扰测量的壳程温度传感器,且已经对干扰通道进行了初步建模,模型结构通过仿真进行了验证。前馈控制第 1 个问题需要通过传感器选型来进行解决;而为了弥补前馈控制存在的第 2 个问题,设计了以下两种方法来提升整体控制效果:(1) 在式(8)机理模型的基础上,通过设计系统辨识的方法对干扰通道模型进行辨识,采用辨识结果计算前馈控制通道;(2) 在方法 1 的基础上结合自抗扰控制算法,方法 1 中前馈控制的超前作用能够降低控制时间,自抗扰控制作为反馈控制算法,能够减小模型误差对前馈控制带来的影响,增强系统的稳定性。前馈-自抗扰算法控制结构如图 4 所示。

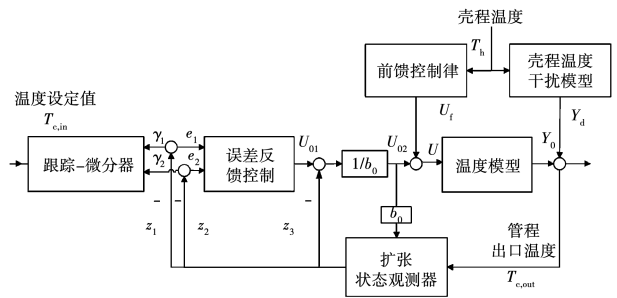


图 4 前馈-自抗扰控制算法原理结构图
Fig. 4 Schematic diagram of feedforward-active disturbance rejection control principle

图中 U_{01} 为误差反馈控制律输出控制量, U_{02} 为抗扰控制算法最终输出控制量, U_f 为前馈算法控制流量, U 为自抗扰控制算法与前馈算法总控制量, Y_0

为原温度模型输出, Y_d 为干扰通道温度模型输出。

首先, 对干扰通道进行辨识。在搭建的 AMESim 模型中, 使壳程温度按照 M 序列进行变化, 并采集管程出口温度作为模型输出^[16], 采用 MATLAB 系统辨识工具箱, 经过多次测试, 得到辨识精度在 90% 以上的传递函数。在对被控对象(管程入口 - 出口温度环节)的辨识研究中, 选取辨识结果中精度最高的模型, 精度为 90.22%, 该情况下传递函数为:

$$G_{ca}G_{cc} = \frac{0.03117s + 8.032e - 7}{s^3 + 0.1342s^2 + 0.004347s + 7.432e - 7} \tag{14}$$

式中: s —拉普拉斯算子; G_{cc} —管程换热器温度模型; G_{ca} —管程除换热器外其他设备和管道的广义温度模型。

干扰通道辨识精度最高的模型结果为:

$$G_{hc} = \frac{3.446s - 0.001915}{s^3 + 180.1s^2 + 11.3s + 2.665e - 6} \tag{15}$$

式中: G_{hc} —干扰通道模型。

根据前馈控制的不变性原理, 要求前馈控制环节 G_{ff} 能满足:

$$G_{hc} + G_{ff}G_{ca}G_{hh} = 0 \tag{16}$$

结合式(14) ~ (16), 得到前馈控制环节 G_{ff} 为:

$$G_{ff} = \frac{b_4s^4 + b_3s^3 + b_2s^2 + b_1s + b_0}{a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0} \tag{17}$$

式 17 中系数 α_n 和 b_n 定义如表 1 所示。

表 1 系数表

Tab. 1 Coefficient table

系数	数值
b_4	-3.446
b_3	-0.460 6
b_2	-0.014 72
b_1	5.765×10^{-6}
b_0	1.423×10^{-9}
α_4	0.031 17
α_3	5.612
α_2	0.352 4
α_1	9.161×10^{-6}
α_0	2.141×10^{-12}

在此基础上, 加入设计的自抗扰控制算法, 并在 Simulink 中设计前馈 - 自抗扰控制算法。其中自抗扰控制算法采用封装子模块实现, 前馈控制直接采用对应传递函数环节实现。同时, 设定与 AMESim 中定义的模型的联合仿真模块, Simulink 结构图如图 5 所示。

图 5 的 Simulink 中联合仿真接口用于与图 6 中 AMESim 软件联合仿真接口进行数据交互, AMESim 向 Simulink 发送模型的管程、壳程温度, Simulink 向 AMESim 发送执行器控制量。

加入执行器环节和回流环节后, AMESim 中被控对象结构图与联合接口如图 6 所示。

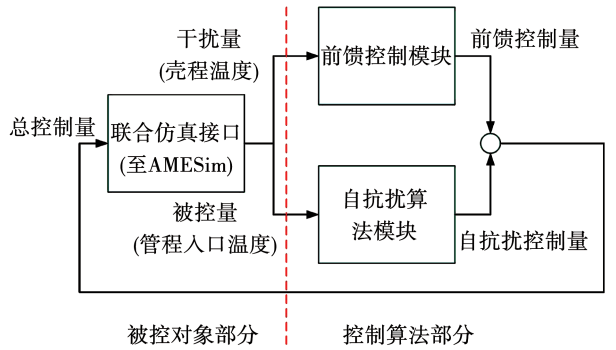


图 5 Simulink 结构图

Fig. 5 Structure diagram of Simulink

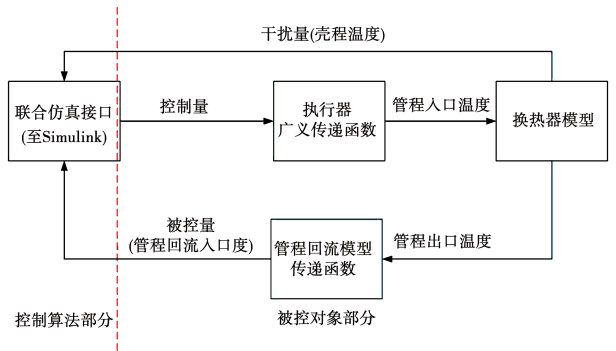


图 6 AMESim 中的被控对象

Fig. 6 Controlled object in AMESim

3.3 仿真结果与分析

采用图 5 和图 6 中的仿真程序对前馈 - 自抗扰控制算法进行了仿真, 同时为了进一步研究该算法的特点和控制效果, 保持 AMESim 中被控对象参数

不变的基础上,在 Simulink 中还设计了传统 PID 控制、前馈 PID 控制^[17]以及自抗扰控制 3 种对比算法,用来与前馈-自抗扰算法进行控制效果对比。由于初始干扰的存在,在不改变 AMESim 模型的基础上很难对 PID 参数进行整定,通过对多组参数对比,选择 1 组初始波动较大,但能够较快稳定的 PID 控制参数,即 $K_p = 0.5$, $K_i = 0.015$, $K_d = 0.05$ 。此外,自抗扰算法的参数选择采用基于步长的幂次形式参数经验公式,选取 $h = 0.15$, $b_0 = 5$,其他参数通过经验公式计算^[14]。4 种控制算法的控制结果如图 7 所示。

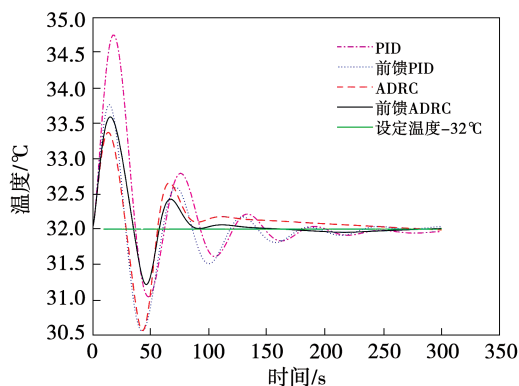


图 7 4 种算法的仿真控制结果

Fig. 7 Simulation control results of four algorithms

由图 7 可知,PID 控制效果存在较大波动且调节时间长;前馈 PID 减小了 PID 控制的超调量,但没有改善调节时间;自抗扰控制(ADRC)超调量小于 PID 控制,且能够较快进入 ± 0.5 °C 误差带,但调节过程波动很大;前馈自抗扰(前馈 ADRC)相较于其他算法在调节过程中波动最小,能够在 50 s 内进入 ± 0.5 °C 误差带,且稳定状态下控制精度高,稳态误差最小,是 4 种算法中效果最好的控制算法。

4 结 论

针对换热器动态换热试验研究中一类动态换热过程的温度控制问题,分析了换热过程管、壳程温度控制模型的机理模型,设计了用于温度控制的前馈-自抗扰控制算法,通过理论分析和多种控制算法对比试验验证,得到结论:

(1) 在温度控制任务中应用前馈控制算法,能够较好地实现对控制初始产生偏差的补偿;

(2) 前馈-自抗扰控制算法结合了前馈控制和自抗扰控制的特点,既提高了系统控制速度,也提高了系统控制精度,效果优于对比的 PID 算法与自抗扰算法;

(3) 前馈-自抗扰控制以其超调量小,控制精度高的特点,能够满足特定动态换热工况 (35 ± 0.5) °C 的控制要求。

参考文献:

- [1] JIM H. Standards of the tubular exchanger manufacturers association [M]. New York: Tubular Exchanger Manufacturers Association, 1999.
- [2] 马春岭. 换热器性能检测系统应用研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
MA Chun-ling. Application research of heat exchanger performance detection system [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [3] 王镜清. 板式换热器气阻特性测试系统研制 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018.
WANG Jing-qing. Development of a test system for the air resistance characteristics of a plate-fin heat exchanger [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2018.
- [4] BEIER R A. Transient heat transfer in a U-tube borehole heat exchanger [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62 (1): 256 - 266.
- [5] VASANTHI D, PRANAVAMOORTHY B, PAPPA N. Online estimation and adaptive temperature control of polymerization reactor [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(32): 301 - 306.
- [6] 李盛伟, 张来, 梁海深. 基于串级 PID 的相变储能电锅炉温度控制技术 [J]. 热能动力工程, 2020, 35(8): 85 - 89.
LI Sheng-wei, ZHANG Lai, LIANG Hai-shen. Temperature control technology of phase change energy storage electric boiler based on cascade PID [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(8): 85 - 89.
- [7] 朱斌. 自抗扰控制入门 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.
ZHU Bin. Introduction to active disturbance rejection control [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2017.
- [8] 管志敏. 自抗扰控制器对一类热工对象的控制性能研究 [J].

热能动力工程,2011,26(4):445-448,495-496.

GUAN Zhi-min. Research on the control performance of an active disturbance rejection controller for a class of thermal objects[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26 (4):445-448,495-496.

[9] 陶文铨. 传热学[M]. (第五版). 北京:高等教育出版社,2019.

TAO Wen-quan. Heat transfer [M]. (Fifth Edition). Beijing: Higher Education Press, 2019.

[10] 张兴中, 黄 文, 刘庆国. 传热学[M]. 北京:国防工业出版社,2011.

ZHANG Xing-zhong, HUANG Wen, LIU Qing-guo. Heat transfer [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.

[11] BONILLA J, ALBERTO D L C, RIDRÍGUEZ-GARCÍA M M, et al. Study on shell-and-tube heat exchanger models with different degree of complexity for process simulation and control design [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 124:1425-1440.

[12] 张国元, 于宗玲, 郑权义, 等. 基于 AMESim 的空气循环温控系统建模及控制优化[J]. 自动化应用, 2020(5):7-9.

ZHANG Guo-yuan, YU Zong-ling, ZHENG Quan-yi, et al. Modeling and control optimization of air circulation temperature control system based on AMESim [J]. Automation Applications, 2020 (5):7-9.

[13] 陈增强, 刘俊杰, 孙明玮. 一种新型控制方法——自抗扰控制技术及其工程应用综述[J]. 智能系统学报, 2018, 13(6): 865-877.

CHEN Zeng-qiang, LIU Jun-jie, SUN Ming-wei. A new type of control method—a review of active disturbance rejection control technology and its engineering application [J]. Journal of Intelligent Systems, 2018, 13(6):865-877.

[14] 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008.

HAN Jing-qing. Active disturbance rejection control technology—control technology for estimating and compensating uncertain factors [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.

[15] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12):1498-1510.

GAO Zhi-qiang. Exploration of active disturbance rejection control thought [J]. Control Theory and Application, 2013, 30 (12): 1498-1510.

[16] 刘金琨, 沈晓蓉, 赵 龙. 系统辨识理论及 MATLAB 仿真 [M]. 北京:电子工业出版社,2013.

LIU Jin-kun, SHEN Xiao-rong, ZHAO Long. System identification theory and MATLAB simulation [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.

[17] 戴连奎. 过程控制工程[M]. 北京:化学工业出版社,2012.

DAI Lian-kui. Process Control Engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.

(刘 颖 编辑)