

虚拟未建模动态补偿驱动的双率自适应控制

杨天皓^{1,2} 李健¹ 贾瑶¹ 刘腾飞¹ 柴天佑^{1,3}

摘要 工业换热过程是蒸汽与循环水在换热器中进行热交换,使供水温度达到工艺规定的目标范围内的复杂工业过程.由于存在蒸汽压力、回水流量波动以及换热器内管壁结垢的扰动,导致被控对象模型参数发生未知随机的大范围变化,使控制器积分作用失效,造成内环蒸汽流量和外环供水温度波动,相互影响,甚至谐振.针对上述问题,利用工业换热过程运行在工作点附近的特点,用确定性低阶线性模型和虚拟未建模动态来描述被控过程.将自适应信号法与双率控制技术相结合,提出了以蒸汽流量为内环输出、以供水温度为外环输出的双率自适应控制器,并给出了该控制器的稳定性和收敛性分析.本文将工业换热过程机理模型作为被控对象,进行了半实物仿真.结果表明,对于工业换热过程,在模型参数大范围变化时,本文提出的控制方法可以将供水温度控制在工艺要求的目标范围内.

关键词 虚拟未建模动态补偿,工业换热过程,区间控制,PI控制

引用格式 杨天皓,李健,贾瑶,刘腾飞,柴天佑.虚拟未建模动态补偿驱动的双率自适应控制.自动化学报,2018,44(2): 299–310

DOI 10.16383/j.aas.2018.c160623

Dual-rate Adaptive Control Driven by Virtual Unmodeled Dynamics Compensation in Industrial Heat Exchange Process

YANG Tian-Hao^{1,2} LI Jian¹ JIA Yao¹ LIU Teng-Fei¹ CHAI Tian-You^{1,3}

Abstract Industrial heat exchanging process is a complex industrial process, in which of heat exchange between steam and circulating water aims to ensure water temperature within the target range formatted by users. As a result of steam pressure fluctuation, returned water flow-rate fluctuation and fouling in heat exchanger, the parameters of a plant model may vary frequently, which is why the integral action loses its effectiveness. When the above disturbances occur violently and frequently, the integral action of cascade control would fail. This would cause fluctuations on the steam flow-rate and the supplied water temperature, or even lead to serve system resonance. To solve the above problems, in this paper, considering the heat exchange process runs near its operating point, low-order linear models and virtual unmodeled dynamics are used to express plant model. By combining the dual-rate control technique and adaptive signal method, an adaptive dual-rate controller is proposed, whose inner loop feedback variable is the steam flow and whose outer loop feedback variable is the supply water temperature. The stability of the control system is analyzed theoretically. A semi-physical simulation experiment using the mechanism model as the virtual plant. The result shows that the control method proposed in this paper has adaptive capacity without any identification, and that the supply water temperature can also be controlled within the target range of process requirements.

Key words Virtual unmodeled dynamics compensation, industrial heat exchange, interval control, PI control

Citation Yang Tian-Hao, Li Jian, Jia Yao, Liu Teng-Fei, Chai Tian-You. Dual-rate adaptive control driven by virtual unmodeled dynamics compensation in industrial heat exchange process. *Acta Automatica Sinica*, 2018, 44(2): 299–310

收稿日期 2016-09-02 录用日期 2017-04-21

Manuscript received September 2, 2016; accepted April 21, 2017
国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2015AA043802), 国家自然科学基金 (61603393), 中国博士后科学基金 (2015M581355) 资助

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2015AA043802), National Natural Science Foundation of China (61603393), and China Postdoctoral Science Foundation (2015M581355)

本文责任编辑 姜斌

Recommended by Associate Editor JIANG Bin

1. 东北大学流程工业综合自动化国家重点实验室 沈阳 110819 2. 北京矿冶科技集团有限公司信息技术与自动化研究设计所 北京 102628
3. 国家冶金自动化工程技术研究中心 沈阳 110819

1. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819 2. Institute of Information Technology and Automation, Beijing Gen-

工业换热过程是蒸汽与循环水在换热器进行热量交换实现热传输介质转换的非线性不确定串级工业过程^[1].

对这类被控过程,文献 [2–4] 分别提出了模糊滑模控制器、基于 PID 的设定值优化控制器和模糊逻辑控制器;文献 [5] 以蒸汽阀门开度为控制输入,以蒸汽流量为内环输出,以供水温度为外环被控输出,提出了基于状态观测器的反馈串级控制方法.上述方法^[2–5]均采用定值控制策略.对于地处温差大的

eral Research Institute of Mining and Metallurgy (BGRIMM) Technology Group, Beijing 102628 3. National Engineering Research Center of Metallurgy Automation, Shenyang 110819

西部的厂区的换热过程,采用定值控制,不仅难以避免供水温度的波动,而且会造成蒸汽流量大范围波动,使蒸汽阀门频繁动作,使阀门损坏.

文献 [6] 将室外温度和回水流量作为可测干扰,采用前馈串级和规则推理补偿的区间控制方法,克服了室外温度和热用户放水对供水温度的影响.但是,该结果没有考虑蒸汽压力波动和换热器内管壁结垢对供水温度的动态影响.蒸汽压力的随机频繁波动会引起模型参数的变化,使蒸汽流量闭环控制系统处于动态变化之中.工业用水的水质问题会引起换热器内管壁结垢,使供水温度模型参数发生未知随机变化,难以采用基于参数辨识的自适应控制方法^[7-8].模型参数的未知大范围变化导致供水温度波动,内外环相互影响,使供水温度运行在目标范围之外,甚至发生谐振^[9].

本文以中国西部某选矿厂的工业换热过程为被控对象,将未建模动态、干扰和参数时变等动态特性考虑为虚拟未建模动态.利用前一拍虚拟未建模动态可测的特点,使用虚拟未建模动态补偿的 PI 控制方法设计蒸汽流量控制器;采用提升技术^[10]将蒸汽流量内环闭环控制系统的动态特性引入供水温度动态模型;采用虚拟未建模动态补偿的一步最优 PI 控制策略设计供水温度控制器.理论分析和半实物仿

真实验结果表明,对于参数变化的工业换热过程,本文设计的控制器具有自适应能力,可以使供水温度控制在工艺要求的目标值范围内.

1 控制问题描述

1.1 被控过程描述

本文考虑的工业换热过程的工艺流程如图 1 所示.该过程的主要设备包括汽水板式换热器、软水器、软化水箱、供水阀门、蒸汽阀门、补水泵和循环泵^[1].

如图 1 所示,由热电厂提供的蒸汽,经过蒸汽调节阀以流量 F_1 进入汽水板式换热器;在补水压力 P_b 和供水压力 P_g 的共同作用下,回水以流量 F_3 和温度 T_3 进入到汽水板式换热器.在板式换热器内,蒸汽将热量传递给回水.本文考虑的控制目标是使供水温度 $y_2(T)$ 处于工艺需求的目标范围之内,即

$$|y_2(T) - y_{2sp}| \leq \delta_1 \quad (1)$$

其中, y_{2sp} 为供水温度的目标值, δ_1 为供水温度波动幅度的上限.

考虑到本文研究的工业换热过程地处中西部,室外温度变化频繁且温差大.自热电厂产生的蒸汽

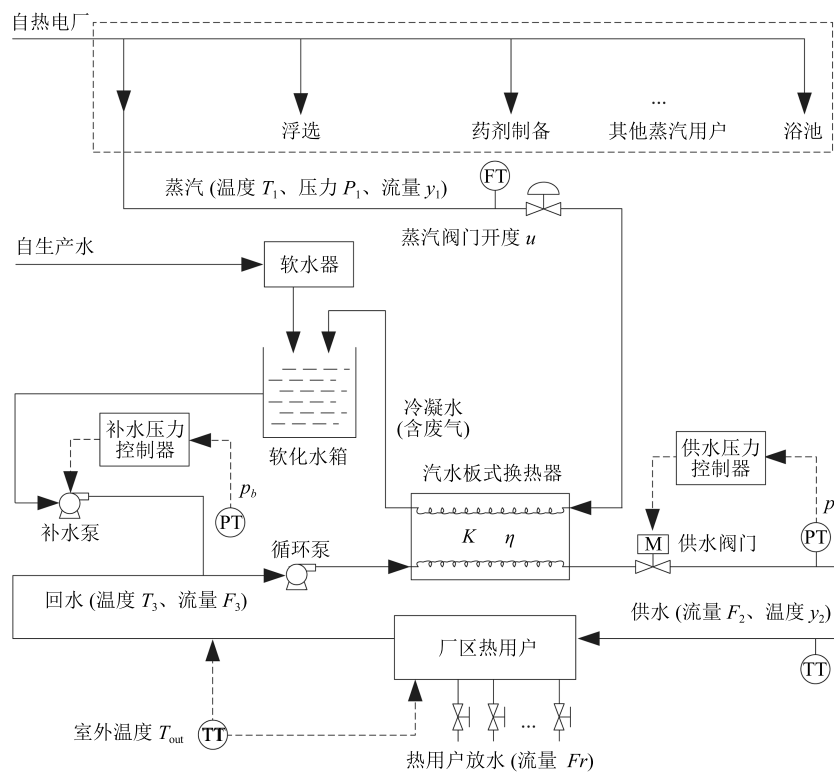


图 1 工业换热过程工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of industrial heat exchange process

供多个工厂用户使用, 每个蒸汽用户根据各自的需求调节其阀门开度, 导致蒸汽压力的波动. 同时, 换热站为多个车间热用户供水, 热用户放水的不确定性会导致回水流量和回水压力波动. 不仅如此, 由于循环水中含有金属离子, 受热时会在板式换热器的内管壁结垢, 造成换热效率等系统运行参数的时变.

本文的主要目的是设计串级控制器, 其以蒸汽阀门开度 $u(k)$ 为控制输入、以蒸汽流量 $y_1(k)$ 为内环被控输出、以供水温度 $y_2(T)$ 为被控输出, 在有限时间内将供水温度 $y_2(T)$ 控制到工艺需求的目标范围之内.

1.2 工业换热过程动态特性分析

根据文献 [1], 建立以蒸汽阀门开度 $u(k)$ 为输入, 以蒸汽流量 $y_1(k)$ 为输出的蒸汽流量动态模型, 即

$$y_1(k) = \theta_1(y_1(k), u(k), k) = \left(1 - \frac{1}{\tau}\right) y_1(k) + \frac{u(k)}{\tau} \sqrt{\frac{\Delta P_1}{\rho_v(P_1(k), T_1)}} \quad (2)$$

其中, τ 为正的时间常数, 与蒸汽管径截面积、调节阀流通能力、阻力系数等有关; $\Delta P_1(k)$ 为调节阀入口与出口的压差, 与蒸汽总管压力 $P_1(k)$ 有关; ρ_v 为蒸汽流量的平均密度, 与蒸汽压力和温度有关.

由于热电厂同时为多个蒸汽用户提供蒸汽, 其他蒸汽用户使用蒸汽存在不确定性, 这会导致蒸汽压力的波动. 从而使模型参数 $P_1(k)$ 和 $\rho_v(P_1(k), T_1)$ 随着系统运行而发生未知变化.

蒸汽通过阀门后, 进入板式换热器, 与回水进行热交换, 文献 [11] 建立了热交换过程的动态模型:

$$y_2(T+1) = y_2(T) + \theta_2(y_1(T), y_2(T), T) \quad (3)$$

其中,

$$\begin{aligned} \theta_2(y_1(T), y_2(T), T) = & -f(\mathbf{X})(F_3(T) + F_b)\rho_w c_w y_2(T) + \\ & f(\mathbf{X})\left(H_v(T)y_1(T) + \rho_w c_2 F_3(T)T_3 + \right. \\ & \left. \rho_w c_w F_b T_b\right) - f(\mathbf{X})\rho_w c_w F_4(T)T_4(T) \end{aligned} \quad (4)$$

$$f(\mathbf{X}) = \frac{1.15}{V\beta(T)K\eta(T)} \left(\ln \frac{T_1 - T_4}{y_2(T) - T_3}\right)^2 \frac{T_1 - T_4 - y_2(T) + T_3}{y_2(T) - T_3} - \ln \frac{T_1 - T_4}{y_2(T) - T_3} \quad (5)$$

其中, $\mathbf{X} = [T_1, y_2(T), T_3, T_4]^T$; V 为换热管道内所能容纳水的体积; $\beta(T)$ 为传热面污垢修正系数; K 和 $\eta(T)$ 分别为换热器的传热系数和换热效率, 与换热器中的结垢等情况有关; H_v 为蒸汽的热焓, 与蒸汽总管温度 T_1 和压力 $P_1(T)$ 有关, 其温度 T_1 和压力 $P_1(T)$ 由热电厂保证; F_b 为补水流量, 由补水控制回路保证, T_b 为补水温度, 为常温; ρ_w 与 c_w 分别为水的密度和比热.

由于工业用水中硬度较高, 含有金属离子, 换热器内管壁容易结垢, 导致模型参数 $\beta(T)$ 和 $\eta(T)$ 的未知变化; 同时, 由于换热器内管壁结垢, 导致热传递受阻, 使 $\eta(T)$ 发生未知变化. 上述两参数的时变会引起供水温度 $y_2(T)$ 和蒸汽流量 $y_1(k)$ 频繁波动. 而蒸汽流量环控制系统的动态特性必然影响供水温度环的动态特性, 采用不考虑内环闭环控制系统动态特性的串级控制对供水温度 $y_2(T)$ 进行控制时, 不仅造成供水温度 $y_2(T)$ 波动在目标范围外, 而且可能造成谐振.

2 控制方法

被控对象工作点处的模型由参数已知的确定性低阶线性部分和虚拟未建模动态部分组成. 本节利用前一拍虚拟未建模动态可测的特点, 设计前一拍虚拟未建模动态补偿的一步最优 PI 控制器. 控制器在模型参数未知变化的情况下具有自适应能力.

1) 设计带有虚拟未建模动态补偿的一步最优蒸汽流量 PI 控制器, 得到蒸汽流量闭环控制系统; 2) 利用在外环采样周期内, 内环蒸汽流量的设定值不变, 利用提升技术得到一个与之等价的采样周期为外环采样周期的外环供水温度动态模型; 3) 利用外环动态模型设计供水温度虚拟未建模动态补偿的一步最优 PI 控制器.

2.1 控制器驱动模型

将被控对象模型用工作点处的线性化部分和高阶非线性部分的和表示. 其中, 线性部分用参数已知的确定性低阶线性模型表示, 将干扰、非线性部分、模型参数变化等用虚拟未建模动态表示. 将式 (2) 转化为

$$A_1^*(z^{-1})y_1(k+1) = B_1^*(z^{-1})u(k) + v_1(k) \quad (6)$$

其中,

$$A_1^*(z^{-1}) = 1 - \frac{\partial \theta_1}{\partial y_1} \Big|_{y_2=y_{2sp}} z^{-1} \quad (7)$$

$$B_1^*(z^{-1}) = \frac{\partial \theta_1}{\partial u} \Big|_{y_2=y_{2sp}} \quad (8)$$

v_1 为关于 k 的函数, 表示蒸汽阀门数学模型中的虚

拟未建模动态.

将式 (3) 转化为

$$A_2^*(z^{-1})y_2(T+1) = B_2^*(z^{-1})y_1(T) + v_2(T) \quad (9)$$

其中,

$$A_2^*(z^{-1}) = 1 - \left(1 + \frac{\partial \theta_2}{\partial y_2} \Big|_{y_2=y_{2sp}} \right) z^{-1} \quad (10)$$

$$B_2^*(z^{-1}) = \frac{\partial \theta_2}{\partial y_1} \Big|_{y_2=y_{2sp}} \quad (11)$$

v_2 为关于 T 的函数, 表示工业换热过程的虚拟未建模动态.

在实际系统中蒸汽流量、换热效率等物理参数的变化不会在有限时间内发散到无穷. 于是, 存在 $M_1 > 0$, 使

$$|\Delta v_1(k)| \leq M_1 \quad (12)$$

对所有 $k \geq 0$ 成立; 存在 $M_2 > 0$, 使

$$|\Delta v_2(T)| \leq M_2 \quad (13)$$

对所有 $T \geq 0$ 成立. 式 (12) 和式 (13) 同物理实验结果相符.

2.2 双率控制结构设计

工业换热过程的双率串级控制结构如图 2 所示. 在所建立的被控过程动态模型的基础上, 本文将双率串级控制、一步超前最优 PI 控制、虚拟未建模动态补偿相结合, 提出一种基于双率控制的虚拟未建模动态补偿 PI 控制方法. 该方法在考虑被控过程相关参数发生未知频繁大范围变化的基础上, 采用广义一步最优控制策略来设计 PI 控制器, 充分利用虚拟未建模动态的历史数据对 PI 控制器进行补偿, 将供水温度 $y_2(T)$ 控制在工艺目标范围内.

在该控制系统中, 内环以蒸汽流量为反馈变量, 通过引入控制器驱动模型, 采用虚拟未建模动态补

偿 PI 控制, 设计蒸汽流量控制器. 采用提升技术, 将蒸汽流量内环闭环控制系统的动态特性引入供水温度模型, 于是得到以蒸汽流量设定值 $y_{1sp}(T)$ 为输入, 以供水温度 $y_2(T)$ 为输出的被控对象模型, 采用对虚拟未建模动态补偿的一步最优 PI 控制律设计供水温度控制器, 从而实时产生蒸汽流量控制内环的设定值 $y_{1sp}(T)$, 通过蒸汽流量内环控制, 使蒸汽流量 $y_1(k)$ 跟踪设定值 $y_{1sp}(T)$, 从而实现对供水温度的控制.

2.3 蒸汽流量控制器设计

针对被控对象 (6), 设计图 3 所示的带有虚拟未建模动态补偿的 PI 控制方法. 设计如下形式的控制律:

$$u(k) = H_1^{-1}(z^{-1}) (G_1(z^{-1}) (y_{1sp}(k) - y_1(k)) - K_1(z^{-1})v_1(k)) \quad (14)$$

其中, 根据式 (6), 有 $v_1(k) = A_1^*(z^{-1})y_1(k) - B_1^*(z^{-1})u(k-1)$.

为了设计控制参数 $G_1(z^{-1})$ 、 $H_1(z^{-1})$ 、 $K_1(z^{-1})$ 根据文献 [12] 引入控制器设计性能指标

$$J_1 = (P_1(z^{-1})y_1(k+1) - R_1(z^{-1})y_{1sp}(k) + Q_1(z^{-1})u(k) + S_1(z^{-1})v_1(k))^2 \quad (15)$$

其中, $P_1(z^{-1})$ 、 $R_1(z^{-1})$ 、 $Q_1(z^{-1})$ 、 $S_1(z^{-1})$ 均为关于 z^{-1} 的多项式. 为求取使性能指标 (15) 极小的最优控制律, 定义广义输出 $\phi_1(k+1)$ 为

$$\phi_1(k+1) = P_1(z^{-1})y_1(k+1) \quad (16)$$

定义广义理想输出 $\psi_1(k+1)$ 为

$$\psi_1(k+1) = R_1(z^{-1})y_{1sp}(k) - Q_1(z^{-1})u(k) - S_1(z^{-1})v_1(k) \quad (17)$$

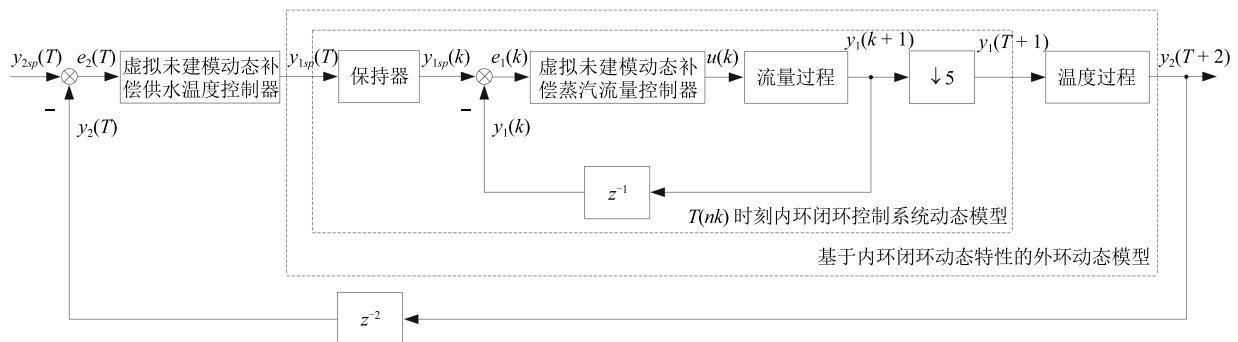


图 2 工业换热过程双率串级控制结构框图

Fig. 2 Block diagram of dual-rate cascade control in industrial heat exchange process

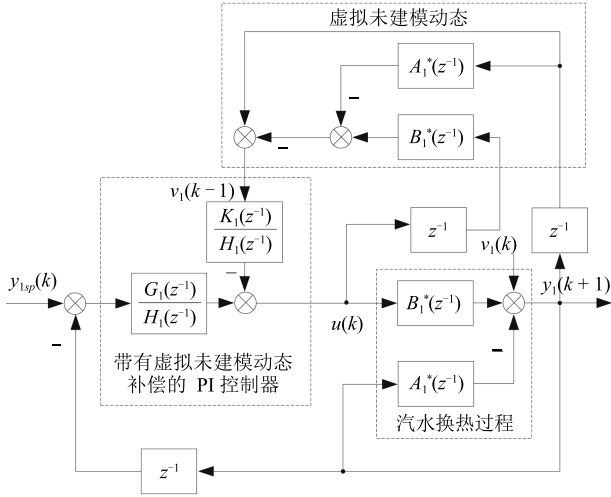


图3 蒸汽流量虚拟未建模动态补偿控制结构框图

Fig.3 Block diagram of virtual unmodeled dynamics compensation control in vapor flow process

定义广义输出误差为

$$e_{g1}(k+1) = \phi_1(k+1) - \psi_1(k+1) \quad (18)$$

引入 Diophantine 方程

$$P_1(z^{-1}) = F_1 A_1^*(z^{-1}) + z^{-1} G_1(z^{-1}) \quad (19)$$

其中, $F_1 = 1$.

在式 (19) 的等号两端同乘 $y_1(k+1)$, 得

$$P_1(z^{-1})y_1(k+1) = F_1 A_1^*(z^{-1})y_1(k+1) + G_1(z^{-1})y_1(k) \quad (20)$$

将式 (6) 代入式 (19) 得到

$$P_1(z^{-1})y_1(k+1) = G_1(z^{-1})y_1(k) + F_1 B_1^*(z^{-1})u(k) + F_1 v_1(k) \quad (21)$$

因此, 当控制律 $u(k)$ 的参数按照式 (22) 选取时, 性能指标取得最小值, 并且 $J_{1\min} = \Delta v(k)$.

$$\begin{cases} H_1(z^{-1}) = F_1 B_1^*(z^{-1}) + Q_1(z^{-1}) \\ R_1(z^{-1}) = G_1(z^{-1}) \\ K_1(z^{-1}) = S_1(z^{-1}) + F_1 \end{cases} \quad (22)$$

此时的控制律为一步最优控制律. 将控制律 (14) 设计为带有建模动态补偿的 PI 控制器的形式:

$$u(k) = u(k-1) + k_{p1}(e_1(k) - e_1(k-1)) + k_{i1}e_1(k) - K_1(z^{-1})v_1(k-1) \quad (23)$$

其中, $e_1(k) = y_{1sp}(k) - y_1(k)$, k_{p1} 与 k_{i1} 分别为 PI 控制器中的比例系数与积分系数.

因此

$$\begin{cases} G_1(z^{-1}) = (k_{p1} + k_{i1}) - k_{p1}z^{-1} \\ H_1(z^{-1}) = 1 - z^{-1} \end{cases} \quad (24)$$

将设计的控制律 (14) 代入被控对象模型 (6), 可得

$$T_1(z^{-1})y_1(k+1) = B_1^*(z^{-1})G_1(z^{-1})y_{1sp}(k) + (H_1(z^{-1}) - B_1^*(z^{-1})K_1(z^{-1}))v_1(k) + H_1(z^{-1})\Delta_1(k) \quad (25)$$

其中,

$$T_1(z^{-1}) = A_1^*(z^{-1})H_1(z^{-1}) + z^{-1}B_1^*(z^{-1})G_1(z^{-1})$$

BIBO 稳定通过系统输入输出信号的有界性来描述系统的稳定性^[13-14]. 本文使用 BIBO 稳定来刻画这种存在虚拟未建模动态的控制系统的稳定性. 为了保证系统 BIBO 稳定, 设计 PI 参数 k_{p1} 、 k_{i1} , 使 $T_1(z^{-1})$ 满足对任意 $|z| > 1$ 都有

$$T_1(z^{-1}) \neq 0 \quad (26)$$

为了消除虚拟未建模动态 $v_1(k)$ 对系统的影响, 通过设计 $K_1(z^{-1})$, 使

$$H_1(z^{-1}) - B_1^*(z^{-1})K_1(z^{-1}) = 0 \quad (27)$$

考虑到 $B_1^*(z^{-1}) \neq 0$ 对任意的 $|z| > 1$ 成立, 根据式 (27), 取

$$K_1(z^{-1}) = \frac{H_1(z^{-1})}{B_1^*(z^{-1})} \quad (28)$$

2.4 基于提升技术的供水温度模型

本文研究的工业换热过程被控对象模型参数发生未知随机变化, 造成供水温度外环和蒸汽流量内环始终处于动态变化之中, 蒸汽流量内环的输出为供水温度外环被控对象模型的输入, 该动态模型的输入为采样周期小的蒸汽流量, 输出是采样周期大的供水温度, 是一个双速率系统, 因此, 需要采用提升技术, 建立与该动态模型等价的采样周期为供水温度外环采样周期的供水温度外环动态模型.

根据式 (25) 和式 (28), 有

$$T_1(z^{-1})y_1(k+1) = B_1^*(z^{-1})G_1(z^{-1})y_{1sp}(k) + H_1(z^{-1})\Delta v_1(k) \quad (29)$$

将输入输出方程式 (29) 转化为最小实现的状态空间方程:

$$\mathbf{x}(k+1) = A\mathbf{x}(k) + B y_{1sp}(k) + D \Delta v_1(k) \quad (30)$$

$$y_1(k) = C\mathbf{x}(k) \quad (31)$$

由式 (30) 可得

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(nk + i + 1) = & A\mathbf{x}(nk + i) + \\ & By_{1sp}(nk + i) + D\Delta v_1(nk + i) \end{aligned} \quad (32)$$

令 $i = 0, 1, \dots, n - 1$ 进行迭代, 得到

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(nk + n) = & A^n \mathbf{x}(nk) + \\ & \sum_{j=0}^{n-1} A^{n-j-1} \left(By_{1sp}(nk + j) + \right. \\ & \left. D\Delta v_1(nk + j) \right) \end{aligned} \quad (33)$$

利用零阶保持器, 使

$$y_{1sp}(nk) = y_{1sp}(nk + j) \quad (34)$$

其中, $j = 1, 2, \dots, n - 1$.

设

$$\bar{\mathbf{v}}(nk) = \sum_{j=0}^{n-1} A^{n-j-1} D\Delta v_1(nk + j)$$

令 $T = nk$, 则状态方程式 (30) 和输出方程式 (31) 分别化为

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(T + 1) = & A^n \mathbf{x}(T) + \\ & \left(\sum_{j=0}^{n-1} A^j B \right) y_{1sp}(T) + \bar{\mathbf{v}}(T) \end{aligned} \quad (35)$$

$$y_1(T) = C\mathbf{x}(T) \quad (36)$$

将上述两式转化为输入输出方程的形式:

$$T_0(z^{-1})y_1(T + 1) = D_0(z^{-1})y_{1sp}(T) + \hat{v}_1(T) \quad (37)$$

其中,

$$\begin{cases} T_0(z^{-1}) = \det(I - z^{-1}A^n) \\ D_0(z^{-1}) = C \operatorname{adj}(I - z^{-1}A^n) \left(\sum_{j=0}^{n-1} A^j B \right) \\ \hat{v}_1(T) = C \operatorname{adj}(I - z^{-1}A^n) \bar{\mathbf{v}}(T) \end{cases} \quad (38)$$

式中 I 表示与方阵 A 阶次相同的单位阵, \det 与 adj 分别表示方阵所对应的行列式与伴随矩阵.

将式 (37) 代入式 (6), 得到以为输入以为输出的模型:

$$A_3^* y_2(T + 2) = B^*(z^{-1})y_{1sp}(T) + v_3(T) \quad (39)$$

其中,

$$\begin{cases} A_3^*(z^{-1}) = T_0(z^{-1})A_2^*(z^{-1}) \\ B_3^*(z^{-1}) = D_0(z^{-1})B_2^*(z^{-1}) \\ v_3(z^{-1}) = B_2^*(z^{-1})\hat{v}_1(T) + T_0(z^{-1})v_2(T + 1) \end{cases} \quad (40)$$

由式 (33) 和式 (35) 可得

$$\begin{aligned} v_3(T) = & B_2^*(z^{-1})C \operatorname{adj}(I - z^{-1}A^n) \times \\ & \left(\sum_{j=0}^{n-1} A^{n-j-1} D\Delta v_1(nk + j) \right) + \\ & T_0(z^{-1})v_2(T + 1) \end{aligned} \quad (41)$$

由式 (10)、式 (11) 和式 (41), 存在 $\delta_2 > 0$ 使

$$|\Delta v_3(T)| \leq \delta_2 \quad (42)$$

其中, $\Delta v_3(T) = v_3(T) - v_3(T - 1)$.

2.5 供水温度控制器设计

采用基于蒸汽流量内闭环动态模型的供水温度动态模型 (39), 设计由虚拟未建模动态补偿和一步最优 PI 控制器组成的供水温度控制器, 其结构如图 4 所示.

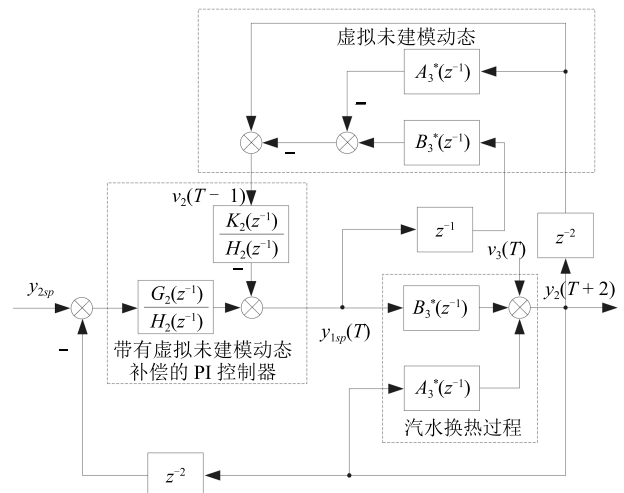


图 4 供水温度虚拟未建模动态补偿控制结构框图

Fig. 4 Block diagram of virtual unmodeled dynamics compensation control in supply-water temperature process

引入控制器设计性能指标如下:

$$\begin{aligned} J_2 = & (P_2(z^{-1})y_2(T + 2) - R_2(z^{-1})y_{2sp} + \\ & Q_2(z^{-1})y_{1sp}(T) + S_2(z^{-1})v_3(T))^2 \end{aligned} \quad (43)$$

其中, $P_1(z^{-1}), R_1(z^{-1}), Q_1(z^{-1}), S_1(z^{-1})$ 均为关于 z^{-1} 的多项式. 通过引入 Diophantine 方程:

$$P_2(z^{-1}) = F_2 A_2^*(z^{-1}) + z^{-2} G_2(z^{-1}) \quad (44) \quad \text{其中,}$$

其中, $F_2 = 1$.

按照与蒸汽流量控制器的相同方法设计图 4 所示的控制律:

$$y_{1sp}(T) = H_2^{-1}(z^{-1}) (G_2(z^{-1})(y_{2sp}(T) - y(T)) - K_2(z^{-1})v_3(T-1)) \quad (45)$$

其中, 根据式 (39) 有 $v_3(T-1) = A_3^*(z^{-1})y_2(T) - B_3^*(z^{-1})y_{1sp}(T-1)$.

$$\begin{cases} H_2(z^{-1}) = F_2 B_3^*(z^{-1}) + Q_2(z^{-1}) \\ R_2(z^{-1}) = G_2(z^{-1}) \\ K_2(z^{-1}) = S_2(z^{-1}) + F_2 \end{cases} \quad (46)$$

此时的控制律为一步最优控制律. 将式 (45) 所示控制律 $y_{1sp}(T)$ 设计为带有建模动态补偿的 PI 控制器的形式, 得

$$\begin{cases} G_2(z^{-1}) = (k_{p2} + k_{i2}) - k_{p2}z^{-1} \\ H_2(z^{-1}) = 1 - z^{-1} \end{cases} \quad (47)$$

其中, k_{p2} 和 k_{i2} 分别为供水温度控制器的 PI 参数.

将设计的控制律 (45) 代入基于提升技术的供水温度模型 (39), 得

$$T_2(z^{-1})y_2(T+2) = B_3^*(z^{-1})G_2(z^{-1})y_{2sp}(T) + (H_2(z^{-1}) - B_2^*(z^{-1})K_2(z^{-1}))v_3(T) + H_3(z^{-1})\Delta v_3(T) \quad (48)$$

其中,

$$T_2(z^{-1}) = A_3^*(z^{-1})H_2(z^{-1}) + z^{-2}B_3^*(z^{-1})G_2(z^{-1})$$

为了保证系统 BIBO 稳定, 取 PI 参数 k_{p2} 、 k_{i2} , 使得对任意 $|z| > 1$ 都有

$$T_2(z^{-1}) \neq 0 \quad (49)$$

为了消除虚拟未建模动态 $v_3(k)$ 对系统的影响, 通过设计 $K_2(z^{-1})$, 使

$$H_2(z^{-1}) - B_3^*(z^{-1})K_2(z^{-1}) = 0 \quad (50)$$

由于任意的 $|z| > 1$, $B_3^*(z^{-1}) \neq 0$, 根据式 (50), 有

$$K_2(z^{-1}) = \frac{H_2(z^{-1})}{B_3^*(z^{-1})} \quad (51)$$

根据式 (48), 得

$$y_2(T+2) = F_1(z^{-1})y_{2sp} + F_2(z^{-1})\Delta v_3(k) \quad (52)$$

$$F_1(z^{-1}) = \frac{B_3^*(z^{-1})G_2(z^{-1})}{T_2(z^{-1})}$$

$$F_2(z^{-1}) = \frac{H_2(z^{-1})}{T_2(z^{-1})}$$

将 $F_2(z^{-1})$ 化为部分分式的形式:

$$F_2(z^{-1}) = \sum_{i=1}^n \frac{r_{2i}}{1 - p_{2i}z^{-1}} \quad (53)$$

其中, n 为多项式 $T_2(z^{-1})$ 的阶次.

根据式 (49) 可知, p_{2i} ($i = 1, 2, \dots, n$) 位于 z 平面以原点为圆心的单位圆内.

并且, 为了达到式 (1) 所示控制目标, 取 k_{p1} , k_{i1} , k_{p2} , k_{i2} , 使得

$$0 < \frac{c\delta_2}{\delta_1} < 1 \quad (54)$$

其中,

$$c = \sum_{i=1}^n \frac{r_{2i}}{1 - |p_{2i}|}$$

由于干扰引起被控对象模型参数未知变化, 造成供水温度和蒸汽流量波动, 使蒸汽流量内环闭环控制系统处于动态之中. 本节采用提升技术获得内环闭环控制系统处于动态环境下的供水温度外环动态模型式 (39) 和式 (40), 但内外环控制的采样周期不改变, 即内环采样周期 $k = 1$ 、外环采样周期 $T = 5$, 这样才能保证在外环采样周期内, 蒸汽流量内环的输出与外环控制器产生的设定值的跟踪误差趋于零, 处于稳态, 从而使供水温度外环的输出与设定值的跟踪误差在目标值范围内.

3 性能分析

本文使用 BIBO 稳定来刻画这种存在虚拟未建模动态的控制系统的稳定性. BIBO 稳定通过系统输入输出信号的有界性来描述系统的稳定性. 本文控制系统的 BIBO 稳定可以描述为系统输出 $y_2(T)$ 在满足式 (42) 的 $v_3(T)$ 的影响下有界. 在满足系统 BIBO 稳定的前提下, 同时需要使输出满足式 (1) 所示控制目标.

定理 1. 被控对象由式 (6) 和式 (9) 表示, 且虚拟未建模动态的每一拍增益有界. 若按照式 (14) 设计虚拟未建模动态补偿蒸汽流量控制器, 并基于提升技术得到式 (39) 所示供水温度模型, 按照式 (45) 设计虚拟未建模动态补偿供水温度控制器, 则可以得到系统输出供水温度有界, 且满足 $|y_2(T) - y_{2sp}| \leq \delta_2$.

证明. 可以根据控制器设计参数, 并利用式 (42) 的条件, 在卷积定理的基础上进行不等式变换, 使定理得到证明.

设

$$y_{21}(T+2) = F_1(z^{-1})y_{2sp} \quad (55)$$

$$y_{22}(T+2) = F_2(z^{-1})\Delta v_3(T) \quad (56)$$

因此,

$$y_2(T) = y_{21}(T) + y_{22}(T) \quad (57)$$

下面分别考虑 $y_{21}(T)$ 和 $y_{22}(T)$ 对系统的影响. 根据终值定理^[15], 有

$$\begin{aligned} \lim_{T \rightarrow \infty} y_{21}(T) &= \lim_{z \rightarrow 1} (1 - z^{-1})F_1(z^{-1}) \frac{y_{2sp}}{1 - z^{-1}} = \\ &= y_{2sp} \lim_{z \rightarrow 1} \frac{B_3^*(z^{-1})G_2(z^{-1})}{T_2(z^{-1})} = \\ &= \frac{y_{2sp}B_3^*(1)G_2(1)}{A_3^*(z^{-1})H_2(z^{-1}) + B_3^*(1)G_2(1)} = y_{2sp} \quad (58) \end{aligned}$$

由极限的定义可知, 对所有 $\epsilon_1 > 0$, 存在正整数 N , 使 $|y_{21}(T) - y_{2sp}| < \epsilon_1$ 对所有 $T > N$ 都成立.

将 $F_2(z^{-1})$ 化为部分分式的形式:

$$F_2(z^{-1}) = \sum_{i=1}^n \frac{r_{2i}}{1 - p_{2i}z^{-1}} \quad (59)$$

由于在设计控制器时, 通过极点配置使式 (49) 成立, 因此, p_{2i} ($i = 1, 2, \dots, n$) 均位于 z 平面以原点为圆心的单位圆内.

$F_2(z^{-1})$ 的 z 逆变换 $f_2(T)$ 为

$$f_2(T) = \sum_{i=1}^n r_{2i} p_{2i}^T \quad (60)$$

根据式 (42) 和式 (61), 有

$$\begin{aligned} y_{22}(T) &= \sum_{i=0}^{T-1} f_2(i)\Delta v_3(T-i) \leq \\ &= \left(\sum_{i=0}^{T-1} |f_2(i)| \right) \delta_2 \leq \\ &= \left(\sum_{i=0}^{\infty} |f_2(i)| \right) \delta_2 = c\delta_2 \quad (61) \end{aligned}$$

其中,

$$c = \sum_{i=1}^n \frac{r_{2i}}{1 - |p_{2i}|}$$

同理,

$$y_{22}(T) \geq -c\delta_2 \quad (62)$$

于是,

$$|y_{22}(T)| \leq c\delta_2 \quad (63)$$

由于

$$|y_2(T) - y_{2sp}| \leq |y_{21}(T) - y_{2sp}| + |y_{22}(T)| \quad (64)$$

因此, 对所有的 $\epsilon_1 > 0$, 所有的 $T > N$, 有

$$|y_2(T+2) - y_{2sp}| < c\delta_2 + \epsilon_1 \quad (65)$$

根据式 (54), 可得, 存在 $\epsilon_2 \in (0, 1)$

$$|y_2(T+2) - y_{2sp}| < \epsilon_2\delta_1 + \epsilon_1 \quad (66)$$

令 $\epsilon_1 = (1 - \epsilon_2)\delta_1$, 式 (67) 等价于对所有的 $T > N$,

$$|y_2(T) - y_{2sp}| < \delta_1 \quad (67)$$

即本文控制方法可以保持系统 BIBO 稳定, 同时能够在有限的时间内使供水温度达到控制目标的范围之内. \square

在本文所设计控制方法中, 被控对象模型参数的变化使用虚拟未建模动态, 通过设计虚拟未建模动态补偿机制, 产生了补偿模型参数变化的信号 $K_1(z^{-1})v_1(k)$ 与 $K_2(z^{-1})v_3(T)$, 从而使控制器具有自适应能力.

4 半实物仿真实验

本文所开发的工业换热过程半实物仿真平台如图 5 所示. 其硬件平台包括被控对象计算机、监控计算机、控制器设计计算机、PLC 和虚拟仪表及执行机构.

4.1 被控对象模型

本文以中国某选矿厂的汽水板式换热系统为对象, 将式 (2) 和式 (3) 所示的机理模型作为半实物仿真虚拟被控对象模型. 由于某些参数未知, 为了通过现场输入输出数据获得被控对象模型, 将式 (2) 和式 (3) 作为仿真对象主模型, 其中未知参数部分通过实验由常数代替, 主模型输出 \hat{y}_2 与现场数据输出 \bar{y}_2 的偏差 Δy_2 利用 RBF 神经网络进行学习, 从而建立由机理主模型和神经网络补偿模型组成的换热过程动态模型作为半实物仿真对象模型.

分别考虑蒸汽压力 P_1 、换热效率 η 、污垢修正系数 β 以及回水流量 F_3 波动的情况, 如下式:

$$P_1(k) = \begin{cases} 0.65, & k \leq 10, k > 25 \\ 0.75P_1(k-1) + 0.04, & 10 < k \leq 20 \\ 1.05P_1(k-1) + 0.04, & 20 < k \leq 25 \end{cases} \quad (68)$$

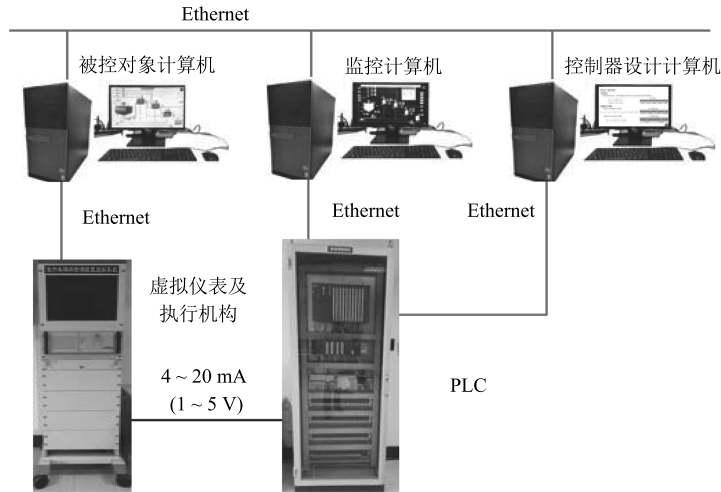


图 5 基于西门子 S7-300 的半实物仿真平台

Fig. 5 Semi-physical simulation platform based on Siemens S7-300

$$\eta(T) = \begin{cases} 0.65, & T \leq 30 \\ 0.8\eta(T-1) + 0.13, & 30 < T \leq 45 \\ 0.7, & T > 45 \end{cases} \quad (69)$$

$$\beta(T) = 10^{-5} (\eta(T) + 0.1 \sin(30\pi T)) \quad (70)$$

$$F_3(T) = 130 - 10 \sin(30\pi T) \quad (71)$$

根据工业换热过程现场的实际情况, 上述四个参数的初值分别为 $P_1(0) = 0.7 \text{ MPa}$, $\eta(0) = 65\%$, $\beta(0) = 9.1$, $F_3(0) = 150 \text{ m}^3/\text{h}$.

图 6 为半实物仿真平台实验运行中被控对象计算机的监控界面, 其中上述四个参数的波动情况如图 7 所示.

供水温度外环采样周期为 5 s, 蒸汽流量内环采样周期为 1 s. 式 (6) 和式 (9) 表示的内外环控制器设计模型如下:

$$\begin{cases} A_1^*(z^{-1}) = 1 - 0.7012z^{-1} \\ B_1^*(z^{-1}) = 0.2458 \\ A_2^*(z^{-1}) = 1 - 0.3012z^{-1} \\ B_2^*(z^{-1}) = 6.1321 \end{cases} \quad (72)$$

4.2 对比仿真

根据热用户的需求, 设定控制目标 $y_{2sp} = 70^\circ\text{C}$, $y_{2sp} = 10^\circ\text{C}$. 根据第 2 节的方法, 进行蒸汽流量控制参数配置, 取 $k_{p1} = 0.2965$, $k_{i1} = 3.1284$, 计算得到 $|\Delta v_3|$ 的上界 $\delta_2 = 4.2$. 根据第 2.5 节的方法, 进行供水温度控制器参数配置, 取 $k_{p2} = 0.4128$, $k_{i2} = 0.0812$.

图 8 是采用本文控制方法时在监控计算机上显示的供水温度曲线. 从图 8 可以看出, 供水温度 y_2

始终保持在目标值 $y_{2sp} = 70^\circ\text{C}$ 附近. 蒸汽压力出现大范围波动的情况下, 在虚拟未建模动态补偿信号的作用下, 供水温度始终保持在目标范围之内.

为对比分析控制效果, 针对同一被控对象模型, 分别使用了常规自校正 PI 串级控制方法和文献 [6] 中的区间串级控制方法进行了半实物仿真. 在监控计算机上所得供水温度曲线分别如图 9 和图 10 所示.

从图 8 可以看出, 采用本文的控制方法, 在扰动大范围且频繁波动的影响下, 利用双率控制方式, 由于前一拍虚拟未建模动态补偿的一步最优 PI 控制器的作用, 保证供水温度 $y_2(T)$ 在目标值 y_{2sp} 附近波动, 供水温度 $y_2(T)$ 的波动范围为 $\pm 5^\circ\text{C}$, 小于控制目标的 $\pm 10^\circ\text{C}$. 从图 9 和图 10 可以看出, 采用常规自校正 PI 控制方法和区间串级规则补偿控制方法, 当供水温度 $y_2(T)$ 出现较大偏差时, 虽然对供水温度的目标值 $y_{2sp}(T)$ 和蒸汽流量的目标值 $y_{1sp}(T)$ 进行了补偿, 但由于扰动波动范围较大且频繁, 使供水温度 $y_2(T)$ 出现较大波动, 在某些时刻运行出控制目标范围之内.

4.3 仿真结果分析

为定量对比控制效果, 分别计算两种控制方法下的供水温度 y_2 相关性能评价指标, 如表 1 所示.

从表 1 可以看出, 在工业换热过程相关参数发生未知变化时, 本文控制方法可以有效抑制这种扰动, 与文献 [6] 的方法相比, 能够使供水温度在满足控制目标的情况下, 受到的波动更小.

5 结论

本文针对具有综合复杂性的工业换热过程, 将未建模动态、干扰和参数时变等考虑为虚拟未建模

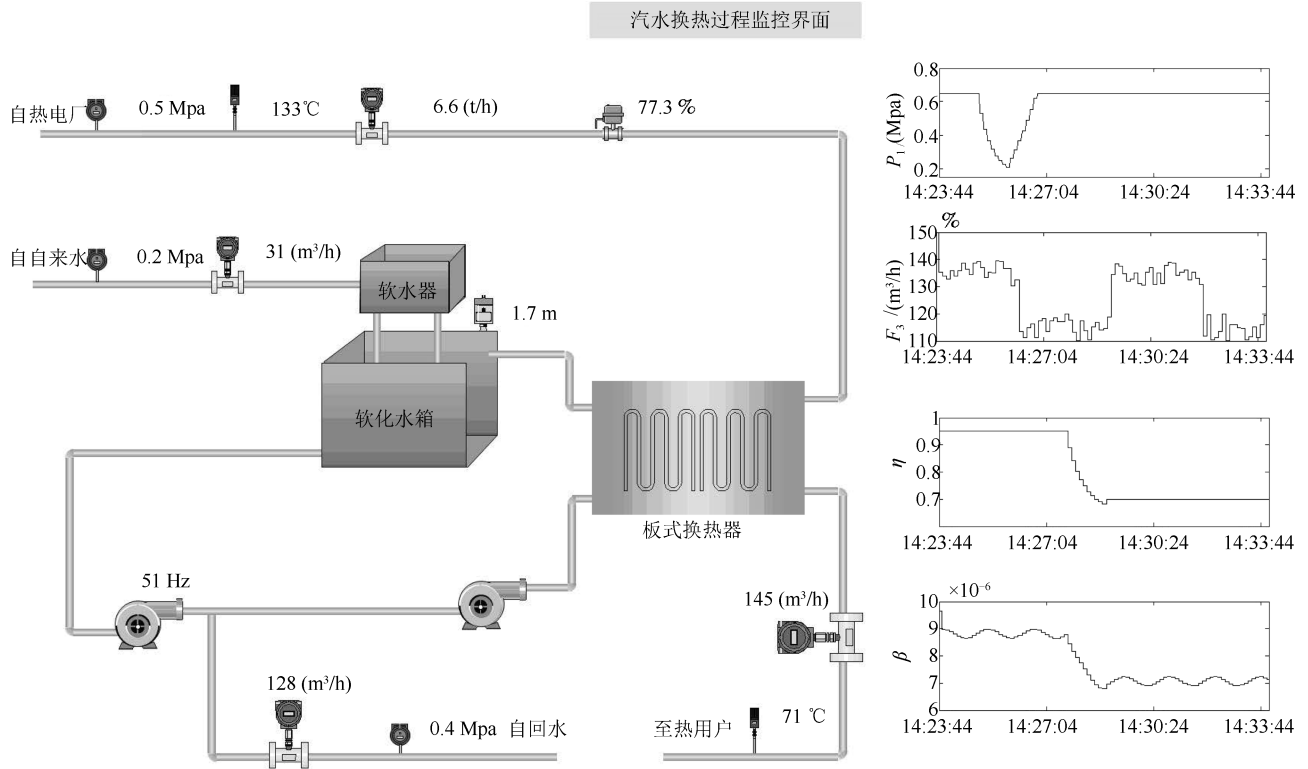


图6 被控对象计算机监控界面
Fig.6 Monitoring interface of virtual plant

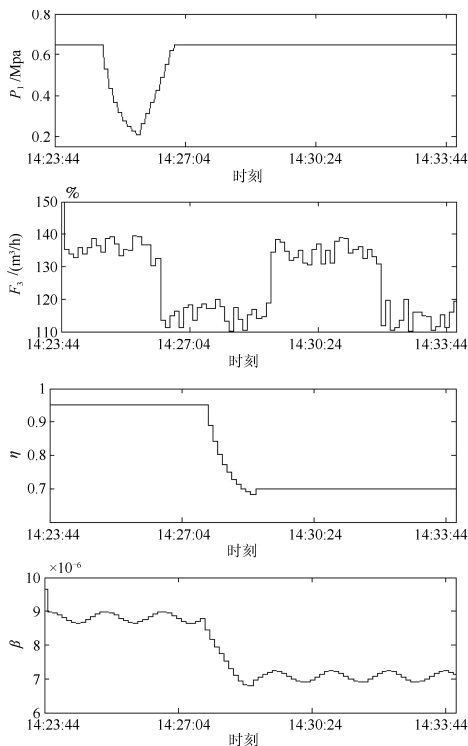


图7 蒸汽压力 P_1 、回水流量 F_3 、换热效率 η 、污垢修正系数 β 的变化曲线
Fig.7 Curve of Vapor pressure P_1 , return-water flow F_3 , efficiency of heat exchange η and fouling correction factor β

动态. 通过产生虚拟未建模动态补偿控制信号, 对PI控制率加以修正, 从而使控制器具有自适应能力. 本文提出的自适应信号控制方法无需参数辨识, 通过基于工业换热过程机理模型的半实物仿真实验, 验证了本文控制方法对模型参数时变的被控过程, 可以将供水温度控制在目标范围内. 这一结果对于解决具有不确定模型参数的复杂工业过程的控制问题具有重要的工程意义.

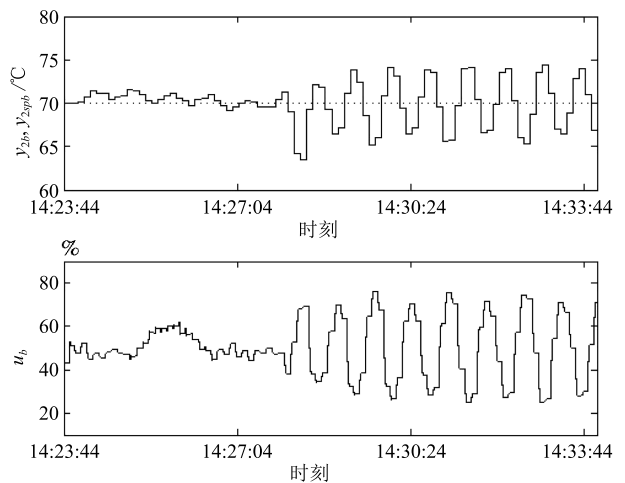


图8 本文控制方法的供水温度及控制律 u
Fig.8 Supply-water temperature and control law u under the control method in this paper

表 1 供水温度性能评价指标 (°C)
Table 1 Evaluating indicator of supply-water temperature (°C)

	超过区间最大值	超过区间绝对累积和	绝对误差累积和	误差均方差
本文控制方法	0	0	96.3753	0.2174
常规自校正 PI 串级	0.971	2.974	297.5423	1.9730
文献 [6] 控制方法	0.732	2.012	22.1754	1.2980

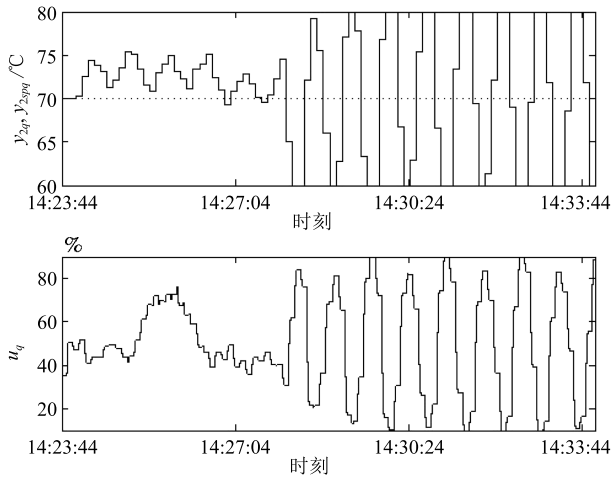


图 9 常规自校正串级控制方法的供水温度及控制律 u
Fig. 9 Supply-water temperature and control law u under traditional self-tuning cascade control

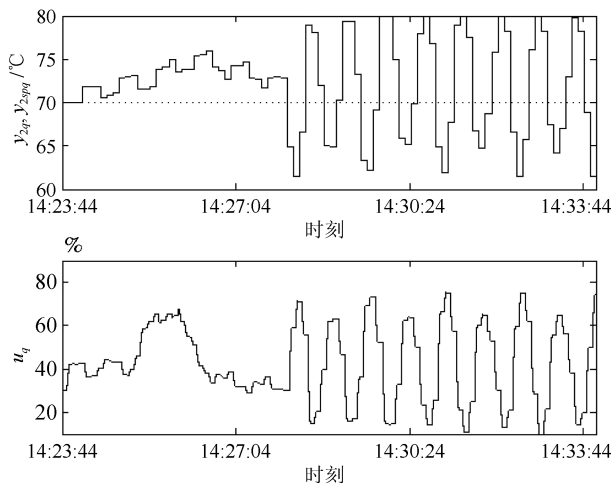


图 10 文献 [6] 控制方法的供水温度及控制律 u
Fig. 10 Supply-water temperature and control law u under the control method in [6]

References

- Shi Zhao-Yu. *The Adjustment of Heating System and Control*. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.
(石兆玉. 供热系统运行调节与控制. 北京: 清华大学出版社, 1994.)
- Zhang J, Sun H X, Zhang J T. Application of adaptive fuzzy sliding-mode controller for heat exchanger system in district heating. In: *Proceedings of the 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. Changsha, China: IEEE, 2008. 850–854
- Wang S Y, Ji F, Du J L, Wang W B. Temperature control of heat exchange station based on ITGC. In: *Proceedings of the 2010 International Conference on Intelligent Control and Information Processing*. Dalian, China: IEEE, 2010. 394–397
- Pandey M, Ramkumar K, Alagesan V. Design of fuzzy logic controller for a cross flow shell and tube heat-exchanger. In: *Proceedings of the 2012 International Conference on Advances in Engineering, Science and Management*. Nagapattinam, Tamil Nadu, India: IEEE, 2012. 150–154
- Rauh A, Dittrich C, Aschemann H, Nedialkov N S, Pryce J D. A differential-algebraic approach for robust control design and disturbance compensation of finite-dimensional models of heat transfer processes. In: *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Mechatronics*. Vicenza, Italy: IEEE, 2013. 40–45
- Jia Yao, Chai Tian-You. Interval cascade intelligent control in vapor-water plate-type heat exchange process. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(1): 37–46
(贾瑶, 柴天佑. 汽水板式换热过程区间串级智能控制方法. 自动化学报, 2016, **42**(1): 37–46)
- Bobál V, Kubalčík M, Dostál P. Identification and self-tuning predictive control of heat exchanger. In: *Proceedings of the 2013 International Conference on Process Control*. Strbske Ples, UK: IEEE, 2013. 219–224
- Tian H, Wu Z K, Qi X J. Design and implementation of cascade fuzzy controller for secondary pipe network of heat exchange station. *International Journal of Control and Automation*, 2015, **8**(8): 75–86
- Huang De-Xian, Wang Jing-Chun, Jin Yi-Hui. *Process Control Systems*. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
(黄德先, 王京春, 金以慧. 过程控制系统. 北京: 清华大学出版社, 2011.)
- Fan Jia-Lu, Jiang Yi, Chai Tian-You. Operational feedback control of industrial processes in a wireless network environment. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(8): 1166–1174
(范家璐, 姜艺, 柴天佑. 无线网络环境下工业过程运行反馈控制方法. 自动化学报, 2016, **42**(8): 1166–1174)
- He Kun, Cai Rui-Zhong, Hao Hong-Bin, Ren Pei-Lian, Li Li. Dynamic modeling of vapor-water heat exchanger. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2003, **43**(12): 1679–1682
(何坤, 蔡瑞忠, 郝洪彬, 任丕莲, 李利. 热网汽水换热站动态模拟. 清华大学学报(自然科学版), 2003, **43**(12): 1679–1682)

- 12 Chai Tian-You, Zhang Ya-Jun. Nonlinear adaptive switching control method based on unmodeled dynamics compensation. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(7): 773–786
(柴天佑, 张亚军. 基于未建模动态补偿的非线性自适应切换控制方法. *自动化学报*, 2011, **37**(7): 773–786)
- 13 Zheng Da-Zhong. *Linear System Theory* (Second edition). Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 213–216
(郑大钟. 线性系统理论. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2002. 213–216)
- 14 Mei Sheng-Wei, Shen Tie-Long, Liu Kang-Zhi. *Modern Robust Control Theory and Application*. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. 42–44
(梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用. 北京: 清华大学出版社, 2003. 42–44)
- 15 Oppenheim A V, Willsky A S, Hamid S. *Signals and System* (Second edition). London: Prentice-Hall, 1997.



杨天皓 北京矿冶科技集团有限公司助理工程师. 2014 年和 2017 年在东北大学获得学士学位和硕士学位. 主要研究方向为选冶过程的建模, 控制与优化.
E-mail: yangtianhao@bgrimm.com
(**YANG Tian-Hao** Assistant engineer at the Institute of Information Technology and Automation, Beijing

General Research Institute of Mining and Metallurgy (BGRIMM) Technology Group. He received his bachelor and master degrees from Northeastern University in 2014 and 2017, respectively. His research interest covers modeling, controlling, and optimization in the process of beneficiation and metallurgy.)



李 健 流程工业综合自动化国家重点实验室助理研究员. 主要研究方向为流程工业综合自动化系统技术. 本文通信作者. E-mail: lijian@mail.neu.edu.cn
(**LI Jian** Research assistant at the State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries. His research interest covers technology for

intergrated automation system of industrial process. Corresponding author of this paper.)



贾 瑶 流程工业综合自动化国家重点实验室博士研究生. 主要研究方向为复杂工业过程控制理论及技术.
E-mail: jiayao.neu@163.com
(**JIA Yao** Ph.D. candidate at the State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries. His research interest covers process control theory and technology for complex industry process.)



刘腾飞 东北大学教授. 主要研究方向为非线性系统稳定性, 鲁棒控制, 自适应控制, 分布式控制.
E-mail: tfliu@mail.neu.edu.cn
(**LIU Teng-Fei** Professor at Northeastern University. His research interest covers nonlinear systems stability, robust control, adaptive control, and distributed control.)



柴天佑 中国工程院院士, 东北大学教授. IEEE Fellow, IFAC Fellow, 欧亚科学院院士. 主要研究方向为自适应控制, 智能解耦控制, 流程工业综合自动化理论, 方法与技术.
E-mail: tychai@mail.neu.edu.cn
(**CHAI Tian-You** Academician of Chinese Academy of Engineering, professor at Northeastern University, IEEE Fellow, IFAC Fellow, and academician of the International Eurasian Academy of Sciences. His research interest covers adaptive control, intelligent decoupling control, as well as theories, methods and technology of integrated automation of process industry.)

professor at Northeastern University, IEEE Fellow, IFAC Fellow, and academician of the International Eurasian Academy of Sciences. His research interest covers adaptive control, intelligent decoupling control, as well as theories, methods and technology of integrated automation of process industry.)