

基于定量反馈理论的时滞系统自抗扰控制参数整定

赵天烽¹, 程 赟^{1†}, 华 亮¹, 李 海², 陈增强³

(1. 南通大学 电气工程学院, 江苏 南通 226019; 2. 南通市醋酸纤维有限公司, 江苏 南通 226008;

3. 南开大学 人工智能学院, 天津 300350)

摘要: 工业过程对象普遍存在时滞、模型参数不确定性和外部扰动多等特点, 传统Smith预估控制方法难以设计出满足期望性能的鲁棒控制器. 针对模型参数不确定性和外部扰动, 本文采用自抗扰控制技术进行估计和补偿. 针对系统存在时滞的特点, 本文提出改进Smith预估器结构, 提升扩张状态观测器对于扰动估计的实时性. 在此基础上, 本文以一阶时滞系统为例提出了控制器参数整定方法. 首先根据最优参数选取准则确定预估器模型, 然后在等效模型框架下采用定量反馈理论整定自抗扰控制器参数, 确保控制系统达到预期性能指标. 在仿真实验中, 将所提出方法与几种常见时滞系统控制方法进行比较, 通过设定值跟踪、抗扰及蒙特卡罗实验验证了所提出方法具有良好抗扰能力与鲁棒性.

关键词: 时滞系统; 自抗扰控制; 改进Smith预估器; 定量反馈理论; 参数整定

引用格式: 赵天烽, 程赟, 华亮, 等. 基于定量反馈理论的时滞系统自抗扰控制参数整定. 控制理论与应用, 2021, 38(5): 578 – 586

DOI: 10.7641/CTA.2020.00494

Tuning of active disturbance rejection control for time-delay systems via quantitative feedback theory

ZHAO Tian-feng¹, CHENG Yun^{1†}, HUA Liang¹, LI Hai², CHEN Zeng-qiang³

(1. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu 226019, China;

2. Nantong Cellulose Fibers Co.Ltd., Nantong Jiangsu 226008, China;

3. College of Artificial Intelligence, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Industrial process generally involves the characteristics of time-delay, parameter uncertainties and external disturbances. It is difficult for traditional control methods with smith predictor to design a robust controller that satisfies the desired performance. For parameter uncertainties and external disturbances, an active disturbance rejection control strategy is used to estimate and compensate the disturbances. For the characteristics of time-delay, a modified smith predictor, which can improve the real-time performance of extended state observer for disturbance estimation, is proposed in this paper. On this basis, a controller parameter tuning method for the first-order time-delay system is proposed. Firstly, the model of the predictor is determined according to the optimal parameter selection criteria. Then, in the framework of equivalent model, the parameters of the active disturbance rejection controller are tuned by quantitative feedback theory in order to achieve the expected performance index. In the simulation experiments, the proposed method is compared with several traditional control methods for time-delay systems. The proposed method has better disturbance rejection performance and robustness in the set point tracking, disturbance rejection and Monte Carlo experiments.

Key words: time delay systems; active disturbance rejection control; modified smith predictor; quantitative feedback theory; parameter tuning

Citation: ZHAO Tianfeng, CHENG Yun, HUA Liang, et al. Tuning of active disturbance rejection control for time-delay systems via quantitative feedback theory. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(5): 578 – 586

收稿日期: 2020-07-31; 录用日期: 2020-12-31.

†通信作者. E-mail: chengyun@ntu.edu.cn.

本文责任编辑: 夏元清.

国家自然科学基金项目(61973175), 江苏省六大人才高峰项目(XNY-039), 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(19KJA350002), 南通市基础科学研究项目(JC2020151)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61973175), the Six Talent Peaks Project in Jiangsu Province (XNY-039), the Major Natural Science Research Project of Jiangsu Higher Education Institutions (19KJA350002) and the Basic Scientific Research Program of Nantong (JC2020151).

1 引言

时滞现象广泛存在于化工、炼油、电力系统等工业过程对象中. 由于时滞会引起系统相位滞后, 导致闭环系统带宽减小, 从而影响系统稳定性和动态特性, 因此时滞系统的控制一直是具有挑战性的问题. 在处理时滞问题中最常见的方法就是Smith预估器(Smith predictor, SP)^[1-2], SP通过对时滞信号进行补偿, 消除闭环回路中的时滞, 从而改善系统性能. 工业界将基于SP的比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制(SP-PID)作为时滞系统的标准控制方式^[3]. 但传统SP-PID设计时需要已知系统的精确模型, 当系统模型存在不确定性时, SP容易导致控制系统动态性能变差, 甚至不稳定, 且控制器的抗扰能力受时滞的影响较大^[4]. 工业过程对象往往同时存在时滞, 模型不确定性和外部扰动, 所以设计控制器时需要同时考虑以上3方面因素.

在处理模型不确定性和外部扰动问题上, 自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)技术是近年来研究的热点. ADRC由我国学者韩京清研究员首次提出^[5-6], 它将模型不确定性和外部扰动视为总扰动, 通过引入扩张状态观测器(extended state observer, ESO)进行实时估计并主动补偿, 所以ADRC具有较强的抗扰能力. 在此基础上, 美国克利夫兰州立大学的高志强教授提出线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)^[7], 并采用带宽法进行调参. 这进一步简化了ADRC的设计, 推进了ADRC在工业界的应用. 随着研究的不断深入, 已有大量文献研究了ADRC在时滞系统中的改进设计^[8-15], 其中将SP与ADRC相结合是当前研究的热点方向. 文献[11]提出基于SP的ADRC(SP-ADRC)控制方法, 利用SP将被控对象输入输出信号同步后输入ESO, 提高了ESO估计总扰动的实时性; 文献[12]分析了SP-ADRC在大时滞系统中的控制性能, 并给出参数整定公式; 文献[13]针对具有右半平面极点的不稳定对象提出新型SP-ADRC控制策略, 通过增加反馈回路使系统稳定; 文献[14]将SP-ADRC等效成二自由度单位反馈模型, 通过内模控制原理对控制器参数进行整定; 文献[15]基于SP-ADRC, DD-ADRC和PO-ADRC三种控制结构, 分析并比较了其在处理时滞和估计总扰动的能力, 给出了各种方法稳定性的条件. 由于受到时滞的影响, 上述方法在控制器参数整定上仍存在较大难度. 当系统具有较大不确定性时, 难以调出兼顾稳定性与期望性能指标的合理参数.

定量反馈理论(quantitative feedback theory, QFT)是针对不确定性系统的鲁棒设计理论^[16-17]. QFT将系统的不确定性及其预期性能指标定量表示为Nichols图中的约束边界, 进而设计具有良好鲁棒性的控制器.

QFT作为一种工程设计方法在航空航天领域有着广泛的应用^[18-19]. 近年来, 文献[20-21]研究利用QFT整定高阶系统ADRC控制器参数, 并获得了满意的性能指标. 针对带有不确定性的时滞系统, 如何运用QFT指导ADRC控制器设计仍是值得研究的问题.

针对上述问题, 本文首先在传统SP结构的基础上提出改进Smith预估器(modified smith predictor, MSP), 通过在预估器中加入比例反馈来增强模型不匹配及存在外界扰动时SP的鲁棒性. 本文进一步将MSP与ADRC相结合提出针对时滞系统的MSP-ADRC控制方法. 其次, 本文将MSP-ADRC从状态空间表达式等效为QFT框架下的二自由度单位反馈结构, 通过最优参数选取准则确定MSP参数. 然后, 利用QFT对参数摄动范围内的所有系统进行分析研究, 设计出满足期望性能的鲁棒控制器. 最后, 通过仿真对比实验证明MSP-ADRC相较于传统方法具有显著抗扰性能和鲁棒性.

2 线性自抗扰控制(LADRC)

2.1 LADRC的基本原理

考虑一个 n 阶系统, 其模型表示如下:

$$y^{(n)}(t) = f(y(t), u(t), d(t)) + bu(t), \quad (1)$$

式中: $y(t)$, $u(t)$ 和 $d(t)$ 分别是系统的输出、输入和外部扰动, b 为控制信号增益, $f(\cdot)$ 可以看作是总扰动, 包含系统内部(未知动态)和外部(扰动)的不确定性.

假设 $f(\cdot)$ 可微且 $\dot{f}(\cdot) = h$, 则式(1)可改写为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Eh(t), \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)},$$

$$B = [0 \ 0 \ \cdots \ b \ 0]_{(n+1) \times 1}^T,$$

$$E = [0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 1]_{(n+1) \times 1}^T,$$

$$C = [1 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 0]_{1 \times (n+1)},$$

$$x(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \cdots \ x_n(t) \ x_{n+1}(t)]_{(n+1) \times 1}^T,$$

$$x_1(t) = y(t), \ x_2(t) = \dot{y}(t), \ \cdots,$$

$$x_n(t) = y^{(n)}(t), \ x_{n+1}(t) = f.$$

其中 $x_{n+1}(t)$ 定义为系统的扩张状态变量.

ADRC的核心思想是估计系统总扰动 f , 通过设计控制律, 主动补偿总扰动使系统等效为串联积分器形

式进行控制. 因此ESO和控制律可设计为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)), \\ \hat{y}(t) = Cz(t), \end{cases} \quad (3)$$

$$u(t) = K(\bar{r}(t) - z(t)), \quad (4)$$

式中:

$$L = [l_1 \ l_2 \ \dots \ l_n \ l_{n+1}]^T, \quad (5)$$

$$K = [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_n \ 1]/b, \quad (6)$$

$$\bar{r}(t) = [r(t) \ \dot{r}(t) \ \dots \ r^{(n-1)}(t) \ 0]^T, \quad (7)$$

$z(t)$ 为 $x(t)$ 的观测值, k_1, k_2, \dots, k_n 为控制器增益, l_1, l_2, \dots, l_n 为观测器增益, $\bar{r}(t)$ 是参考信号的扩张形式.

综上, LADRC可表示为如下状态空间形式:

$$\begin{cases} \dot{z}(t) = (A - LC)z(t) + Bu(t) + Ly(t), \\ u(t) = K(\bar{r}(t) - z(t)), \end{cases} \quad (8)$$

其控制结构如图1所示.

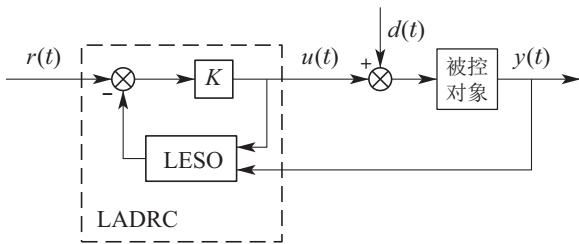


图1 线性自抗扰控制结构
Fig. 1 Structure of LADRC

2.2 LADRC的闭环表示

对式(8)进行Laplace变换, 可得

$$sZ(s) = (A - LC)Z(s) + BU(s) + LY(s), \quad (9)$$

$$U(s) = K(\bar{R}(s) - Z(s)), \quad (10)$$

式中

$$\bar{R}(s) = R(s)[1 \ s \ \dots \ s^{(n-1)} \ 0]^T, \quad (11)$$

其中 $Z(s), U(s), Y(s)$ 和 $\bar{R}(s)$ 分别为 $z(t), u(t), y(t)$ 和 $\bar{r}(t)$ 的Laplace变换.

由式(9)可得

$$Z(s) = (sI - A + LC)^{-1}(BU(s) + LY(s)), \quad (12)$$

将式(12)代入式(10), 可得

$$U(s) = C(s)(H(s)R(s) - Y(s)), \quad (13)$$

式中:

$$C(s) = \frac{K(sI - A + LC)^{-1}L}{1 + K(sI - A + LC)^{-1}B}, \quad (14)$$

$$H(s) = \frac{K[1 \ s \ \dots \ s^{(n-1)} \ 0]^T}{K(sI - A + LC)^{-1}L}. \quad (15)$$

根据式(13)–(15), ADRC可等效为如图2所示二自由度单位反馈结构. 图中 $C(s)$ 为控制器, $H(s)$ 为前置滤波器, $G(s)$ 为被控对象, $D(s)$ 为扰动信号 $d(t)$ 的Laplace变换.

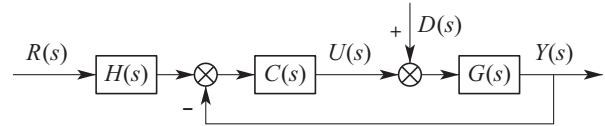


图2 LADRC二自由度单位反馈结构
Fig. 2 Structure of 2-DOF unit feedback for LADRC

当 $G(s)$ 阶次确定时, $C(s)$ 与 $H(s)$ 结构随之确定, 以如下二阶系统为例:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (16)$$

则 $C(s)$ 与 $H(s)$ 为

$$C(s) = \frac{(k_1 l_1 + l_2)s + k_1 l_2}{b(s + l_1 + k_1)s}, \quad (17)$$

$$H(s) = \frac{k_1(s^2 + l_1 s + l_2)}{(k_1 l_1 + l_2)s + k_1 l_2}. \quad (18)$$

3 基于定量反馈理论的改进Smith预估自抗扰控制器

当被控对象参数具有不确定性时, Smith预估器的参数无法精确已知, 且传统SP-ADRC控制方法在时滞系统中的抗扰能力较弱. 本文针对上述问题提出一种改进SP结构和基于QFT的SP-ADRC控制器参数整定方法.

3.1 改进控制器设计

本文所提出的改进结构如图3所示, 在传统SP中加入反馈控制器 T_c , 进一步加强SP的鲁棒性和抗扰能力.

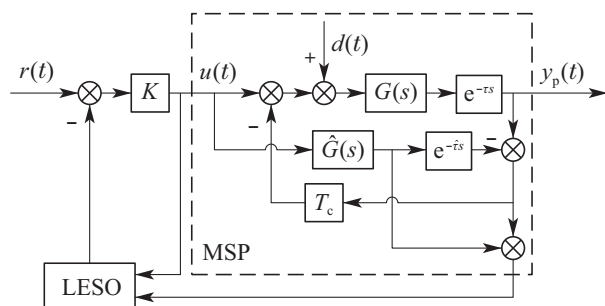


图3 MSP-LADRC的控制结构
Fig. 3 Structure of MSP-LADRC

图中: T_c 为比例反馈环节, $G(s)e^{-\tau s}$ 为实际被控对象, $\hat{G}(s)e^{-\hat{\tau}s}$ 为SP参数模型. 根据图3, 可得

$$Y_p = G_u(s)U(s) + G_d(s)D(s), \quad (19)$$

式中:

$$G_u(s) = \frac{Ge^{-\tau s}(1 + T_c \hat{G}e^{-\hat{\tau}s})}{1 + T_c Ge^{-\tau s}}, \quad (20)$$

$$G_d(s) = \frac{Ge^{-\tau s}}{1 + T_c Ge^{-\tau s}}. \quad (21)$$

当SP参数与被控对象失配或存在外部扰动 $d(t)$ 时, 通过反馈环节 T_c 作用抑制SP输出与实际被控对象输出间的误差, 从而减小模型失配和外部扰动的影响, 提升系统的稳定性与鲁棒性. 以一阶系统为例, 反馈环节 T_c 根据最优相位裕度选择法^[22], 选择

$$T_c = \frac{1}{\hat{K}} \sqrt{\frac{\hat{T}}{\hat{\tau}}}, \quad (22)$$

式中 \hat{K} , \hat{T} 和 $\hat{\tau}$ 分别为SP模型中增益、时间常数和时滞系数.

3.2 控制器参数整定

针对图3控制结构, 将被控对象与MSP模型作为等效被控对象, 则图3可等效为二自由度结构模型, 应用定量反馈理论可对其进行参数整定. 整定流程具体分为两步: 1) 在被控对象参数摄动范围内选取最优Smith预估器参数; 2) 应用QFT对等效控制结构进行参数整定, 具体实现如下.

3.2.1 Smith预估器参数选取

将图3所提出控制结构转换为图4所示的二自由度等效结构.

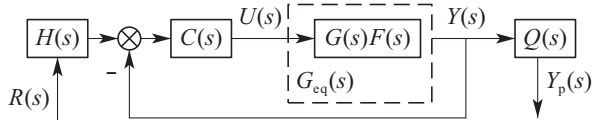


图 4 MSP-LADRC 等效控制结构

Fig. 4 Equivalent structure of MSP-LADRC

图4中: G_{eq} 为等效被控对象, $G_{eq}(s) = G(s)F(s)$,

$$\begin{cases} F(s) = \frac{e^{-\tau s}(1 + T_c \hat{G}e^{-\hat{\tau} s})}{1 + T_c \hat{G}e^{-\tau s}} + \frac{\hat{G}}{G}(1 - e^{-\hat{\tau} s}), \\ Q(s) = \frac{Ge^{-\tau s}(1 + T_c \hat{G}e^{-\hat{\tau} s})}{Ge^{-\tau s}(1 + T_c \hat{G}) + \hat{G}(1 - e^{-\hat{\tau} s})}. \end{cases} \quad (23)$$

图4结构可在QFT框架内实现 $C(s)$ 与 $H(s)$ 的参数整定, 当模型参数完全匹配时 $F(s) = 1$, $Q(s) = e^{-\tau s}$, 时滞在反馈回路中被消除. 当模型不匹配时, 由于 $|Q(s)|$ 不能保证在期望频率内幅值为1 (0 dB), 所以经QFT回路整形后的输出 $Y(s)$ 与系统实际输出 $Y_p(s)$ 间会存在误差. 通过选取合适SP参数保证在期望频率内 $|Q(s)|$ 尽可能接近0 dB, 进而保证 $Y(s)$ 与 $Y_p(s)$ 在动态特性上接近, 满足设计的性能指标. 文献^[23]提出了时滞参数 τ 的选取方法, 文献^[24-25]将问题扩展到SP模型的参数选取, 通过最优准则选取合适的模型参数, 本文将进一步扩展到MSP模型的参数选取中, 具体方法分如下两个步骤进行:

1) 选取合适参数集.

首先将系统的 n 个不确定性参数在取值范围内均分为 γ 等份, 则共有 n^γ 个备选SP模型和被控对象模型. 选取其中一SP模型参数检验其是否在期望带宽频率(BW)内对于任意可能的被控对象 P_j 都有幅值小于 m_d , 即

$$\begin{aligned} |20 \lg |Q(j\omega)|| &\leq m_d, \\ 0 &\leq \omega \leq BW, \forall P_j \in P, \end{aligned} \quad (24)$$

式中: P_j 为第 j 个被控对象模型, P 为被控对象模型集合. 若选取的SP模型参数满足上述条件, 则可作为合适参数.

2) 选取最优参数.

根据步骤1)的选取方法可得到一个合适参数集合, 步骤2)将在集合中选取最优参数. 定量反馈理论中等效被控对象 G_{eq} 在Nichols图的模板面积越小, QFT控制器越容易设计. 因此在满足步骤1)SP模型集合的基础上, 选取性能指标 I 值最小的一组参数作为SP模型参数, 性能指标 I 可设计为

$$I = \frac{1}{n} \sum_{\omega \in \Omega} W(\omega) \frac{A(T_{eq}(j\omega))}{A(T(j\omega))}, \quad (25)$$

式中: $T(j\omega)$ 为被控对象模板, $T_{eq}(j\omega)$ 为等效被控对象模板, $A(\cdot)$ 为模板在Nichols图中面积, $W(\omega)$ 为各研究频率权重, Ω 为研究频率集合, n 为研究频率个数.

3.2.2 基于QFT的控制器参数选取

定量反馈理论中以二自由度单位反馈为标准控制结构, 通过图解的方式在Nichols图中设计出满足所需性能指标的控制器与前置滤波器. 在确定SP参数的基础上采用QFT对图4控制结构中的 $C(s)$ 与 $H(s)$ 进行设计, 从而实现ADRC的参数整定. QFT控制器设计步骤如下:

1) 模板对象定义.

在选定频率内将具有不确定性的被控对象模型在Nichols图中生成模板. 模板表征对象在某一频率点处的不确定范围, 映射到Nichols图中是一片对应区域, 并从中选取一个模型定义为系统的标称对象. 频率点选取为能够表征对象模板最大范围的频率特征点, 一般根据工程实际要求确定.

2) 性能指标设计.

将闭环系统的期望性能指标转化为Nichols图中标称对象 $L(j\omega) = C(j\omega)G_{eq}(j\omega)$ 开环频率响应曲线的一系列约束边界, 通过设计控制器调整标称对象的开环频率响应曲线以满足边界条件. 通常性能指标边界包括:

鲁棒稳定边界

$$M(j\omega) = \left| \frac{G_{eq}(j\omega)C(j\omega)}{1 + G_{eq}(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq W_s, \quad (26)$$

其中: $M(j\omega)$ 为闭环传递函数的幅频特性曲线, W_s 为闭环谐振峰值.

系统的幅值裕度(GM)及相角裕度(PM)与 W_s 有如下关系:

$$\begin{cases} GM = 20 \lg(1 + \frac{1}{W_s}), \\ PM = 2 \arcsin \frac{1}{2W_s}. \end{cases} \quad (27)$$

扰动边界

$$|\frac{Y(j\omega)}{D(j\omega)}| < |\delta_D(j\omega)|, \quad (28)$$

其中 δ_D 为扰动模型,可以为常值或传递函数形式.

跟踪边界

$$T_{lo}(j\omega) \leq T(j\omega) \leq T_{up}(j\omega), \quad (29)$$

式中:

$$T(j\omega) = \frac{H(j\omega)G_{eq}(j\omega)C(j\omega)}{1 + G_{eq}(j\omega)C(j\omega)}, \quad (30)$$

T_{up} 为跟踪上界, T_{lo} 为跟踪下界.

3) 回路整形.

通过添加零极点、增益及积分等方式确定控制器 $C(s)$ 结构,调整标称对象的开环频率曲线以满足性能指标边界要求. $L(j\omega)$ 在所选择的设计频率点处需要位于对应频率点处边界的上方,高频处不与鲁棒稳定边界相交.回路整形中以图解的方式确定控制器,控制器 $C(s)$ 阶次由ADRC等效结构式(14)确定.

4) 前置滤波器设计.

控制器 $C(s)$ 仅使得频率响应变化量小于或等于变化允许范围,但不能保证闭环频率响应满足跟踪上下边界要求,因此通过设计前置滤波器 $H(s)$ 调整系统整体频率响应特性以满足闭环系统跟踪性能.前置滤波器 $H(s)$ 阶次由ADRC等效结构式(15)确定.

根据上述步骤可设计满足系统性能指标要求的 $C(s)$ 与 $H(s)$,根据式(14)–(15)ADRC控制器参数与对应传递函数之间的关系,可在QFT框架内实现史密斯预估自抗扰控制器的参数整定.

4 仿真实例

选取被控对象^[26]

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} e^{-\tau s}, \quad (31)$$

式中: $K \in [8.1, 9.9]$, $T \in [2.25, 2.75]$, $\tau \in [0.63, 0.77]$.

此时MSP参数根据第3.2.1节所提出的选取准则,将 K , T , τ 在取值范围内均分5份,共选取125个备选MSP模型,带宽设置为2.25 rad/s, m_d 选为4 dB.根据步骤1选出的参数集合如图5所示,进一步根据步骤2在表1所示参数选取集合中选取 I 值最小的MSP参数,选取

$$\hat{K} = 8.55, \hat{T} = 2.75, \hat{\tau} = 0.77, T_c = 0.221.$$

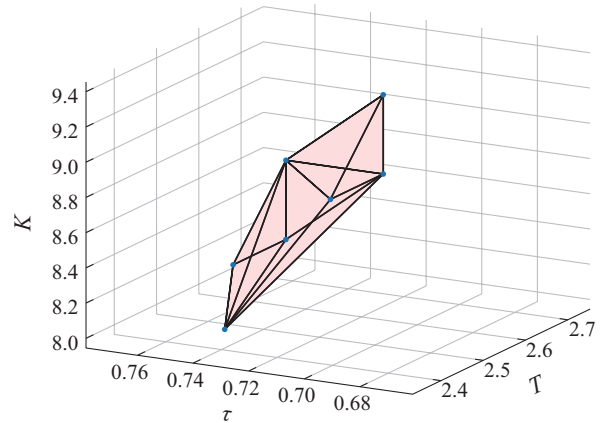


图5 备选SP模型参数集合

Fig. 5 Set of candidate SP model parameters

表1 SP模型参数选取集合

Table 1 Set of SP model parameters selection

	\hat{K}	\hat{T}	$\hat{\tau}$	\hat{T}_c	I
1	8.10	2.375	0.735	0.222	1.0110
2	8.10	2.625	0.770	0.228	0.9766
3	8.10	2.750	0.770	0.233	0.9898
4	8.55	2.625	0.735	0.221	1.0009
5	8.55	2.750	0.735	0.226	1.0152
6	8.55	2.750	0.770	0.221	0.9532
7	9.00	2.750	0.735	0.215	0.9783

4.1 对象模板定义

式(31)被控对象在Nichols图中生成如图6所示对象模板,参考频率点依据文献[26]确定,选取为: $\omega = [0.005 \ 0.001 \ 0.05 \ 0.01 \ 0.5 \ 0.1 \ 1 \ 5 \ 10 \ 50]$ rad/s.

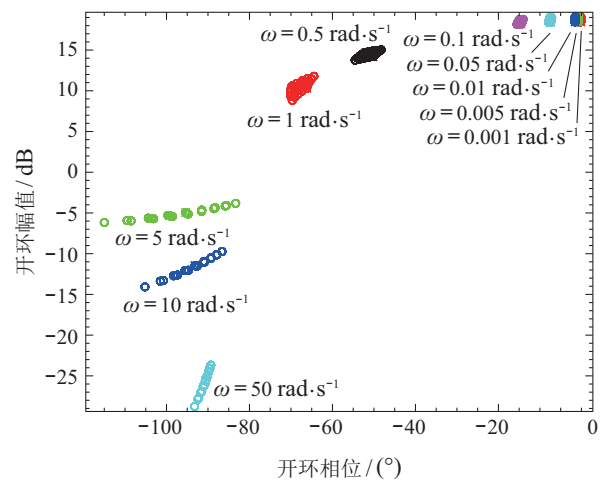


图6 选定频率内被控系统对象模板

Fig. 6 Templates of controlled system at selected frequencies

4.2 性能指标设计

选取系统鲁棒稳定性边界

$$|\frac{G_{eq}(j\omega)C(j\omega)}{1 + G_{eq}(j\omega)C(j\omega)}| \leq W_s = 2.15, \quad (32)$$

其中:

$$\omega = [0.005 \ 0.001 \ 0.05 \ 0.01 \ 0.5 \ 0.1 \ 1 \ 5 \ 10 \ 50] \text{ rad/s.}$$

对应系统的幅值裕度为3.32 dB, 相角裕度为26.9°.

系统的扰动边界为

$$\left| \frac{1}{1 + G_{eq}(j\omega)C(j\omega)} \right| \leq \left| \frac{(j\omega)}{(j\omega) + 2} \right|, \quad (33)$$

其中:

$$\omega = [0.005 \ 0.001 \ 0.05 \ 0.01 \ 0.5 \ 0.1 \ 1] \text{ rad/s.}$$

系统跟踪边界由闭环传递函数 $T(s)$ 的上下界表示为

$$T_{lo}(s) \leq T(s) \leq T_{up}(s), \quad (34)$$

式中:

$$\begin{cases} T_{lo}(s) = \frac{0.98}{0.1s^2 + s + 1}, \\ T_{up}(s) = \frac{s + 1.02}{0.2s^2 + 0.85s + 1}. \end{cases} \quad (35)$$

4.3 回路整形与前置滤波器设计

根据式(17)和式(18)设计控制器与前置滤波器的结构及参数, 所设计系统满足复合边界及跟踪边界. 控制器设计为

$$C(s) = \frac{0.853(s/1.478 + 1)}{s(s/11.8 + 1)}. \quad (36)$$

回路整形结果如图7所示, 校正后标称对象所有频率点均位于Nichols图中对应频率点曲线上方, 且高频处未与鲁棒稳定边界曲线相交.

前置滤波器设计为

$$H(s) = \frac{(s/4.8 + 1)(s/4.8 + 1)}{s/1.478 + 1}. \quad (37)$$

当控制器确定后, 前置滤波器形式随之固定, 此步骤用来验证系统是否满足跟踪边界指标. 系统跟踪性能如图8所示, 校正后输出边界位于设定跟踪边界内, 符合性能指标要求.

根据定量反馈理论设计的控制器与前置滤波器, 对应带宽法^[7]ADRC控制器参数为: $\omega_o = 4.9$, $\omega_c = 2.1$, $b_o = 4.967$.

4.4 仿真验证

将QFT整定后的控制系统进行仿真验证, 仿真中在 $t = 0 \text{ s}$ 加入幅值为1的阶跃信号, 在 $t = 20 \text{ s}$ 处加入幅值为-0.5的阶跃扰动. 将该算法与SP-ADRC算法以及文献[26]提出的基于QFT框架的SP-PID算法进行比较. MSP-ADRC, SP-ADRC和SP-PID均采用本文第3节介绍方法整定参数.

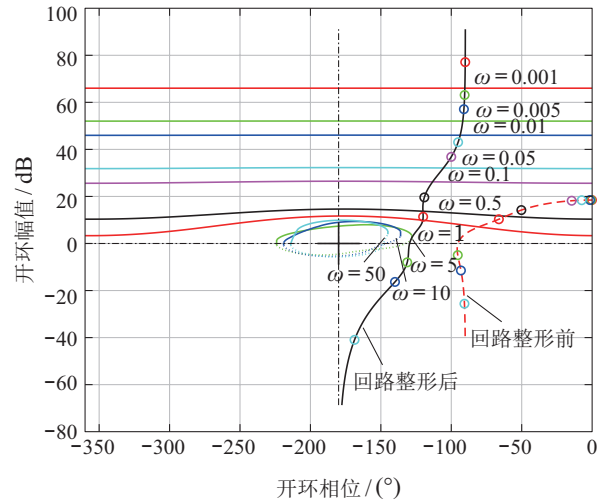


图7 回路整形结果

Fig. 7 Loop shaping results

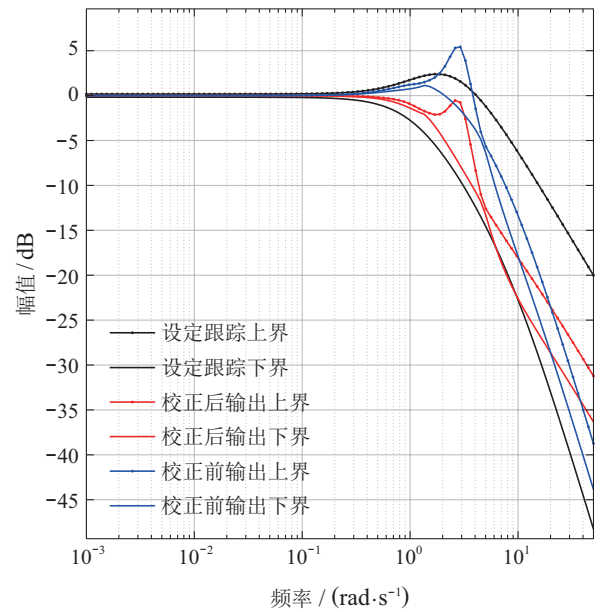


图8 前置滤波器设计结果

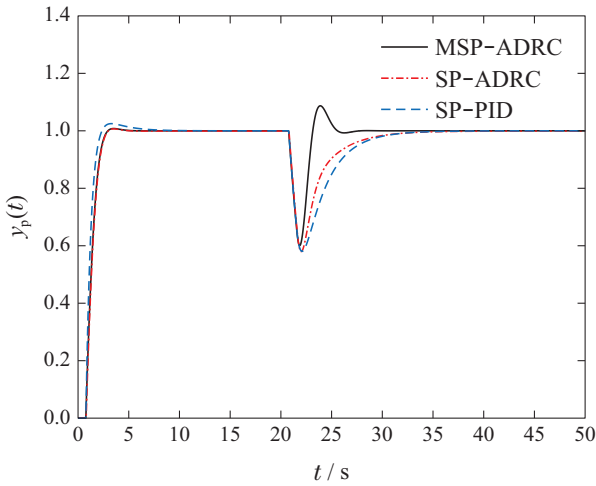
Fig. 8 Prefilter design results

4.4.1 模型匹配时的仿真效果

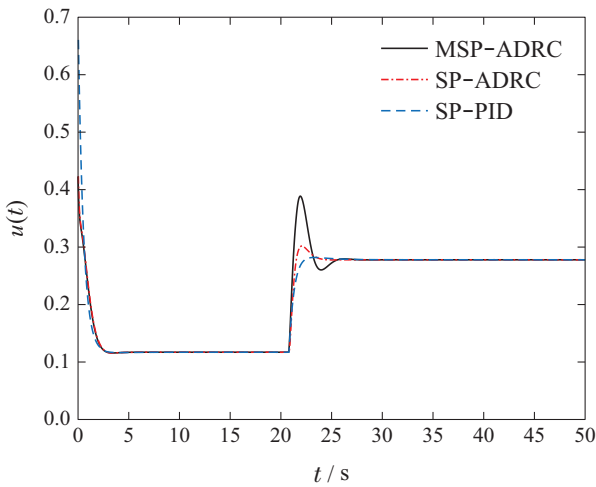
当被控对象与SP模型参数匹配时, 被控量与控制量的输出如图9(a)–9(b)所示. 由图9可以看出, 在预估模型与实际模型完全匹配时, ADRC相较于PID调节时间略慢但超调量小, 控制信号在跟踪阶段更加平稳, 同时在抗扰性能上MSP-ADRC具有显著优势, 相较于其他控制器具有最快的扰动恢复能力.

4.4.2 对象参数摄动时的仿真效果

当被控对象参数在取值范围内随机摄动时, 假设被控对象模型参数为 $K = 9$, $T = 2.5$, $\tau = 0.7$, 此时被控量与控制量的输出如图10(a)–10(b)所示. 由图10可以看出, 当模型3个参数同时随机摄动时, 在跟踪性能上由于反馈环节 T_c 的存在, 会带来一些额外振荡, 跟踪性能与SP-ADRC相似但略逊于SP-PID, 但抗扰性能中MSP-ADRC依旧具有明显优势.



(a) 被控量输出

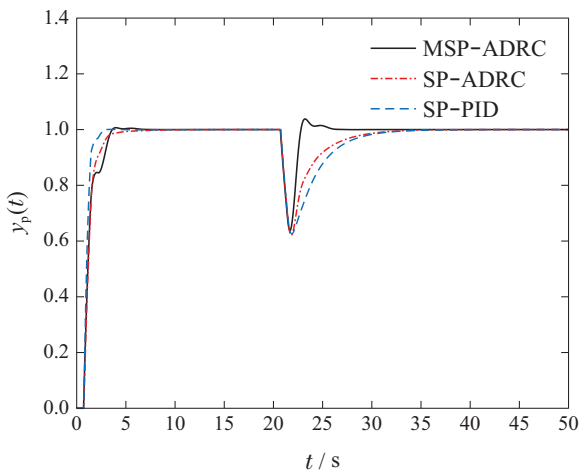


(b) 控制量输出

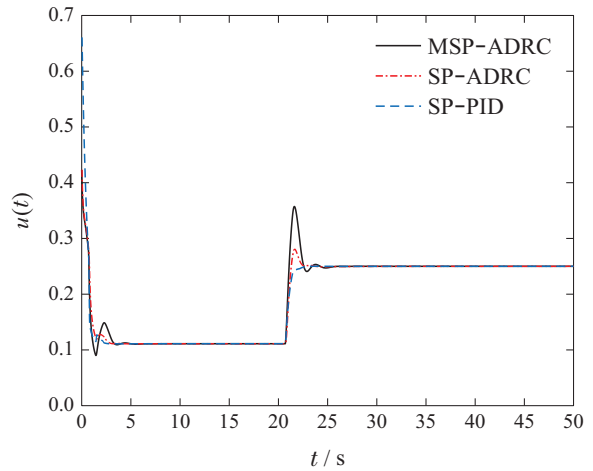
图9 模型参数匹配时系统阶跃响应

Fig. 9 Step response when model parameters are matched

综上,改进SP结构与自抗扰控制相结合,具有良好抗扰能力,同时基于定量反馈理论进行参数调节相较于传统带宽调节的方式鲁棒性更优且可满足工程中对性能指标的实际要求,具有良好应用前景.



(a) 被控量输出



(b) 控制量输出

图10 模型参数摄动时系统阶跃响应

Fig. 10 Step response when model parameters are perturbed

4.5 稳定性分析

将图3MSP-LADRC控制结构化简等效,可得如图11所示闭环结构.

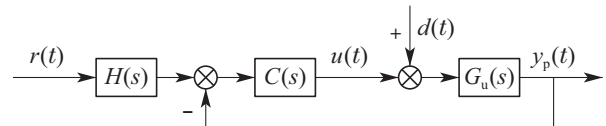


图11 MSP-LADRC等效闭环结构

Fig. 11 Equivalent closed loop structure of MSP-LADRC

图中:

$$C(s) = \frac{(k_1 l_1 + l_2)s + k_1 l_2}{b(s + l_1 + k_1)s + [(k_1 l_1 + l_2)s + k_1 l_2]G_{sp}}, \quad (38)$$

$$H(s) = \frac{k_1(s^2 + l_1 s + l_2)}{(k_1 l_1 + l_2)s + k_1 l_2}, \quad (39)$$

$$G_{sp}(s) = \hat{G}(s)(1 - e^{-\hat{\tau}s}). \quad (40)$$

针对图11系统采用式(36)–(37)整定的控制参数进行稳定性分析. QFT中控制器基于选定离散参考频点设计,本节在满足参考频率点稳定的基础上对连续频率范围进行系统鲁棒稳定性验证.从频域的角度分析参数摄动系统是否满足鲁棒稳定性条件,结果如图12所示.图中设定鲁棒稳定边界由式(32)确定,为系统允许谐振峰值的最大值.图中黑色曲线为参数摄动范围内闭环系统幅频特性曲线的所有可能性,从图中可以看出,该控制系统满足鲁棒稳定性要求.

4.6 鲁棒性分析

为了体现本文所提出算法在鲁棒性和抗扰能力上的优势,本节采用蒙特卡罗实验分析被控对象参数摄动时MSP-ADRC, SP-ADRC与SP-PID3种方法的控制效果.评价指标包括调节时间(t_s)、超调量(M_p)

以及关于跟踪误差的性能指标(IAE), 计算公式如下所示:

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt. \quad (41)$$

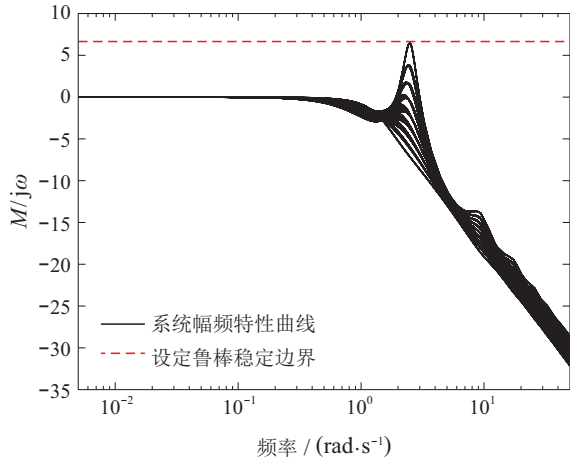


图 12 鲁棒稳定性验证

Fig. 12 Verification of robust stability

针对式(31)系统进行500次蒙特卡罗实验, 仿真结果如图13-15所示. 图中的实验结果数值越小, 则表明系统控制效果越出色. 图中各点越紧密, 则表明系统对参数摄动容忍性越大, 鲁棒性更优. 从图中可以看出, ADRC相较于PID的鲁棒性能更优, MSP-ADRC在鲁棒性上略逊于SP-ADRC. 但从性能指标比较, MSP-ADRC的调节时间、超调量和IAE指标在大部分情况下均优于SP-ADRC和SP-PID方法. 综上, 本文提出的改进Smith预估自抗扰控制具有较好的鲁棒性与动态响应性能.

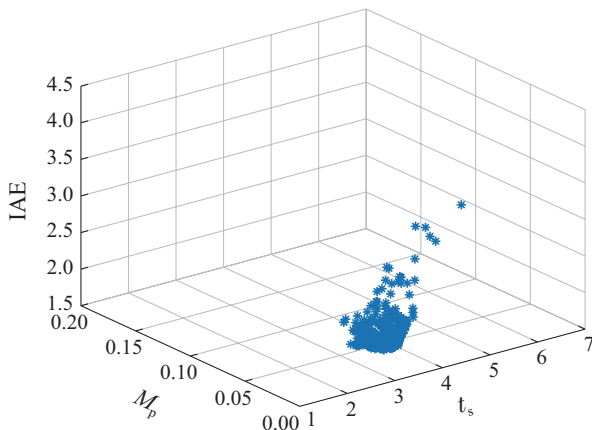


图 13 MSP-ADRC蒙特卡罗实验结果

Fig. 13 Results of Monte Carlo experiment for MSP-ADRC

5 结论

针对具有不确定性的时滞系统, 本文提出基于改进Smith预估的自抗扰控制方法, 并在定量反馈理论框架下实现控制器参数整定, 整定后的控制系统满足

鲁棒性和性能指标设计要求. 以一阶时滞系统为例进行仿真实验, 将本文提出的方法与传统Smith预估自抗扰控制以及Smith预估PID控制方法进行对比, 实验结果表明本文所提出方法具有超调量小、抗扰能力优、鲁棒性强等特点. 该方法为自抗扰控制在时滞系统中的应用提供了积极指导作用.

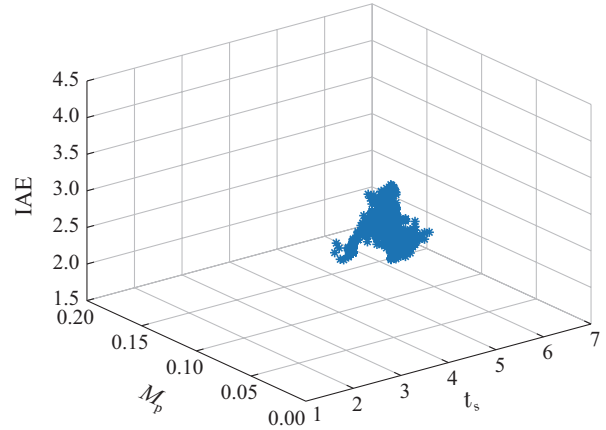


图 14 SP-ADRC蒙特卡罗实验结果

Fig. 14 Results of Monte Carlo experiment for SP-ADRC

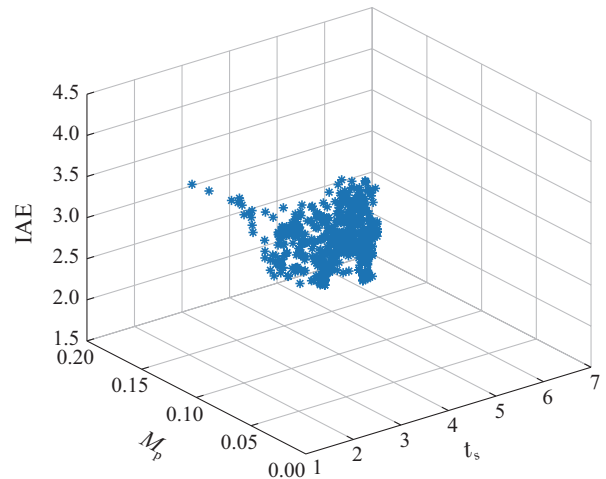


图 15 SP-PID蒙特卡罗实验结果

Fig. 15 Results of Monte Carlo experiment for SP-PID

参考文献:

- [1] ZHANG Weidong, SUN Youxian. Optimal smith predictor and its robust tuning. *Acta Automatica Sinica*, 1997, 23(5): 86 – 89. (张卫东, 孙优贤. 一类Smith预估器及其鲁棒整定. 自动化学报, 1997, 23(5): 86 – 89.)
- [2] NORMEY-RICO J E, CAMACHO E F. Dead-time compensators: a survey. *Control Engineering Practice*, 2008, 16(4): 407 – 428.
- [3] ZENG Zhezhaoh, LIU Wenjue. Wisdom PI control for first-order systems with time-delay. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(8): 1322 – 1328. (曾喆昭, 刘文珏. 一阶时滞系统的智慧PI控制. 控制理论与应用, 2019, 36(8): 1322 – 1328.)
- [4] MARQUEZ R, FLIESS M, MOUNIER H. A non-conventional robust PI-controller for the Smith predictor. *Proceedings of IEEE Conference on Decision & Control*. Orlando, FL, USA: IEEE, 2001: 2259 – 2260.

- [5] HANG Jingqing. Auto-disturbances-rejection controller and its applications. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19 – 23.
(韩京清. 自抗扰控制器及其应用. 控制与决策, 1998, 13(1): 19 – 23.)
- [6] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900 – 906.
- [7] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning. *Proceedings of American Control Conference*. Denver, CO, USA: IEEE, 2003: 4989 – 4996.
- [8] WANG Lijun, LI Qing, TONG Chaonan, et al. Overview of active disturbance rejection control for systems with time-delay. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1521 – 1533.
(王丽君, 李擎, 童朝南, 等. 时滞系统的自抗扰控制综述. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1521 – 1533.)
- [9] ZHANG Binwen, TAN Wen, LI Jian. Tuning of linear active disturbance rejection control via frequency domain approximation. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(5): 831 – 840.
(张彬文, 谭文, 李健. 基于频域近似的线性系统自抗扰参数整定. 控制理论与应用, 2019, 36(5): 831 – 840.)
- [10] CHENG Yun, CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, et al. Multivariable inverted decoupling active disturbance rejection control and its application to a distillation column process. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(6): 1080 – 1088.
(程贇, 陈增强, 孙明玮, 等. 多变量逆解耦自抗扰控制及其在精馏塔过程中的应用. 自动化学报, 2017, 43(6): 1080 – 1088.)
- [11] ZHENG Q L, GAO Z Q. Predictive active disturbance rejection control for processes with time delay. *ISA Transactions*, 2014, 53(4): 873 – 881.
- [12] TANG Decui, GAO Zhiqiang, ZHANG Xuhong. Design of predictive active disturbance rejection controller for turbidity. *Control Theory & Applications*, 2017, 34(1): 101 – 108.
(唐德翠, 高志强, 张绪红. 浊度大时滞过程的预测自抗扰控制器设计. 控制理论与应用, 2017, 34(1): 101 – 108.)
- [13] CHEN Zengqiang, WANG Yongshuai, SUN Mingwei, et al. A new type of active disturbance rejection control with smith and its robustness for non-minimum phase time-delay system. *Journal of Dalian University of Technology*, 2019, 59(1): 88 – 96.
(陈增强, 王永帅, 孙明玮, 等. 非最小相位时滞系统新型Smith自抗扰控制及其鲁棒性. 大连理工大学学报, 2019, 59(1): 88 – 96.)
- [14] ZHANG B W, TAN W, JIAN L. Tuning of Smith predictor based generalized ADRC for time-delayed processes via IMC. *ISA transactions*, 2020, 99: 159 – 166.
- [15] CHEN S, XUE W C, ZHONG S, et al. On comparison of modified ADRCs for nonlinear uncertain systems with time delay. *Science China(Information Sciences)*, 2018, 61(7): 212 – 226.
- [16] HOROWITZ I. Survey of quantitative feedback theory(QFT). *International Journal of Robust & Nonlinear Control*, 2001, 11(10): 887 – 921.
- [17] WANG Zenghui, CHEN Zengqiang, SUN Qinglin, et al. Survey of the development for quantitative feedback theory. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 403 – 410.
(王增会, 陈增强, 孙青林, 等. 定量反馈理论发展综述. 控制理论与应用, 2006, 23(3): 403 – 410.)
- [18] LI Z, ZHOU W, LIU H. Robust controller design of non-minimum phase hypersonic aircrafts model based on quantitative feedback theory. *Journal of the Astronautical Sciences*, 2020, 67(4): 137 – 163.
- [19] WOODBURY T, VALASEK J. Synthesis and flight test of automatic landing controller using quantitative feedback theory. *Journal of Guidance Control & Dynamics*, 2016, 39(9): 1 – 17.
- [20] CHU Z R, WU C, SEPEHRI N. Automated steering controller design for vehicle lane keeping combining linear active disturbance rejection control and quantitative feedback theory. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2018, 232(7): 937 – 948.
- [21] CHU Z R, WU C, SEPEHRI N. Active disturbance rejection control applied to high-order systems with parametric uncertainties. *International Journal of Control Automation & Systems*, 2019, 17(6): 1483 – 1493.
- [22] DE PAOR A, O'MALLEY M. Controllers of ziegler-nichols type for unstable process with time delay. *International Journal of Control*, 1989, 49(4): 1273 – 1284.
- [23] SANTACESARIA C, SCATTOLINI R. Easy tuning of smith predictor in presence of delay uncertainty. *Automatica*, 1993, 29(6): 1595 – 1597.
- [24] GARCIA-SANZ M, GUILLEN J C, IBARROLA J J. Robust controller design for uncertain systems with variable time delay. *Control Engineering Practice*, 2001, 9(9): 961 – 972.
- [25] GARACIA-SANZ M, GUILLEN J C. Smith predictor for uncertain systems in the QFT framework. *Progress in System and Robot Analysis and Control Design*. London: Springer, 1999: 239 – 250.
- [26] GARCIA-SANZ M. *Robust Control Engineering: Practical QFT Solutions*. Boca Raton: CRC Press, 2017: 99 – 118.

作者简介:

赵天烽 硕士研究生, 目前研究方向为自抗扰控制, E-mail: 591540233@qq.com;

程贇 讲师, 博士, 目前研究方向为自抗扰控制、智能预测控制, E-mail: chengyun@ntu.edu.cn;

华亮 教授, 博士生导师, 目前研究方向为先进控制、机器人控制, E-mail: hualiang@ntu.edu.cn;

李海 中级职称, 目前研究方向为精馏塔先进控制、工厂自动化、MES控制, E-mail: ahill@sina.com;

陈增强 教授, 博士生导师, 目前研究方向为智能预测控制与先进控制、复杂系统建模优化与控制, E-mail: chenzyq@nankai.edu.cn.