

线性自抗扰控制理论及工程应用的若干进展

陈增强^{1,2}, 程 赟^{1,2}, 孙明玮¹, 孙青林¹

1. 南开大学计算机与控制工程学院, 天津 300350; 2. 天津市智能机器人重点实验室, 天津 300350

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61573199, 61573197); 天津市自然科学基金资助项目(14JCYBJC18700)

通信作者: 陈增强, chenzq@nankai.edu.cn 收稿/录用/修回: 2017-03-29/2017-05-03/2017-05-08

摘要

自抗扰控制(ADRC)是我国著名控制论学者韩京清教授创立的一种不依赖于被控过程模型的原创性控制思想和方法, 实践表明这是一种具有很好工程应用潜力的新型先进控制技术. 在此基础上, 高志强学者等将 ADRC 的主要环节进行了线性化处理, 提出线性自抗扰控制(LADRC). LADRC 具有结构简单、易于进行性能分析和参数整定等特点, 因此它极大地促进了自抗扰控制理论的深入发展及在工程中的推广应用. 本文在简要概述线性自抗扰控制原理及其设计方法的基础上, 总结了近年来 LADRC 在理论及应用方面的最新研究进展, 包括稳定性分析、针对典型控制问题的设计与综合方案以及在实际工程应用中所取得的一些显著成果. 最后对该方向的后续研究给出了进一步的展望.

关键词

工程控制论
自抗扰控制
线性自抗扰控制
扩张状态观测器
稳定性分析
中图分类号: TP273
文献标识码: A

Surveys on Theory and Engineering Applications for Linear Active Disturbance Rejection Control

CHEN Zengqiang^{1,2}, CHENG Yun^{1,2}, SUN Mingwei¹, SUN Qinglin¹

1. College of Computer and Control Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;

2. Key Lab of Intelligent Robotics of Tianjin, Tianjin 300350, China

Abstract

Active disturbance rejection control (ADRC) was founded by Professor Han Jingqing, a famous Chinese scholar. It uses an original control thought method that is independent of the controlled process model, and is thus a novel control technology with excellent engineering application prospects. Professor Gao Zhiqiang then proposed linear active disturbance rejection control (LADRC) by linearizing the main components of active disturbance rejection control. LADRC has the advantages of a simple structure, an analysis that is simple to perform, and parameter tuning, and as such it has greatly promoted the development of active disturbance rejection control theory and its generalized application in engineering. This review gives a brief overview of the principles and design schemes of LADRC and summarizes recent research advances in its theory and application, including stability analyses, schemes for design and synthesis of typical control problems, and certain remarkable achievements made in practical engineering applications. Finally, further research directions are presented.

Keywords

engineering cybernetics;
active disturbance rejection
control (ADRC);
linear active disturbance
control (LADRC);
extend states observer
(ESO);
stability analysis

1 引言

传统的 PID 控制器是一种基于误差信号的反馈控制, 由于其不依赖被控过程的模型, 并且具有鲁棒性强和控制器结构简单等特点, 因此至今仍然在工程控制实际中占据主要地位. 但是针对一些复杂的控制对象, 如多变量强耦合系统、强非线性系统、大时滞或者变时滞系统、参数时

变系统等, PID 控制难以取得理想控制效果. 现代控制理论自 20 世纪 60 年代诞生以来在理论及应用上均获得了很大的发展, 但大多数的现代控制理论方法依赖于系统的数学模型, 所以在实际工程应用的推广中具有一定的难度. 我国著名控制论学者——韩京清先生——敏锐地看到 PID 控制和模型控制论的区别和特点, 基于系统的能控性、条件不变子空间、状态估计与观测器、非线性系统动态反馈

线性化等经典理论和方法,于20世纪90年代创立了自抗扰控制理论(ADRC)^[1].ADRC继承了经典PID“基于误差来消除误差的思想”^[2-3],将被控对象中的各种未知不确定性因素归结为总扰动,采用扩张状态观测器(ESO)进行实时估计,并将系统补偿为串联积分器标称模型的形式,再构造误差反馈控制器控制该标称模型,从而实现对扰动的抑制,能够获得理想的动态性能和闭环稳定性.ADRC由于其先进实用的设计理念,在工业过程、精密机械、航空航天等领域取得了许多非常成功的应用,体现了很好的工程应用前景,引起国内外控制学者的广泛重视.

但是在最初的ADRC中,扩张状态观测器和误差反馈组合控制器这两个主要环节是以非线性函数形式呈现的,理论分析具有很大难度,在线实现计算复杂度较高,并且要整定的参数较多,不便于工程师在实际应用中进行调试.对此美国克利夫兰州立大学的高志强教授将以上两个环节线性化处理,提出了简化的线性自抗扰控制(LADRC)方法^[4],并利用带宽的概念确定控制器参数,使得整个系统易于调试和实际应用,也便于利用频域方法进行稳定性分析和参数调整.

目前自抗扰控制理论领域发展最快的是线性自抗扰方向,而且自抗扰领域近年来的一些主要工程应用成果也主要是采用线性自抗扰技术,所以这篇综述主要报导与讨论线性自抗扰理论与应用的新进展,当然为保证全文体系的完整性,文中也包含了关于ADRC产生及一些重要的历史性成果的描述.

2 线性自抗扰控制(LADRC)原理

韩京清教授提出的自抗扰控制(ADRC)^[1-3]结构如图1所示.其主要组成包括:跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)、非线性状态误差反馈(NLSEF).其中ESO根据输入输出数据得到系统状态变量的估计值 $z_1 \sim z_n$,以及系统的总扰动 z_{n+1} ;由TD可以得到参考输入 v 的过渡过程 v_1 ,以及 v_1 的各阶微分信号^[5-8].NLSEF根据系统的状态误差 $e_1 \sim e_n$ 计算控制信号 u_0 .若扩张状态观测器和误差反馈均采用线性函数,则可将ADRC简化为LADRC^[4],更利于参数整定和理论分析.在LADRC中,线性扩张状态观测器(LESO)是核心环节,用于实时估计与在线补偿被控系统的总扰动.

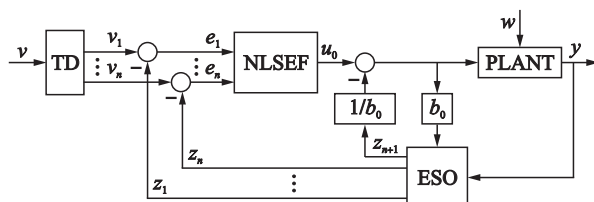


图1 自抗扰控制(ADRC)原理图
Fig.1 Principle map of ADRC

2.1 线性扩张状态观测器(LESO)

LESO是整个LADRC的核心部分,其任务是根据输入输出数据来观测系统的各个状态和总扰动.考虑如下 n 阶

非线性系统:

$$y^{(n)}(t) = f(y^{(n-1)}(t), \dots, y(t), w(t)) + bu(t) \quad (1)$$

其中 $y(t)$ 和 $u(t)$ 是系统的输出和控制输入信号, $w(t)$ 为系统所受的外部扰动, b 为控制器增益, $f(\cdot)$ 为系统动态特性,可能是时变的或非线性的.在ADRC中并不需要知道 $f(\cdot)$ 的任何信息,而是将其视为总扰动,作为系统里一个新的状态变量来表示,则系统的状态空间可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} = x_n \\ \dot{x}_n = x_{n+1} + bu \\ \dot{x}_{n+1} = h(\mathbf{X}, w) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2)$$

其中:系统的总扰动量被扩充为状态变量 x_{n+1} ,记作 $x_{n+1} = f(y^{(n-1)}(t), \dots, y(t), w(t))$,并令 $\dot{x}_{n+1} = h(\mathbf{X}, w)$.这样原 n 阶系统(1)就被扩张成新的 $n+1$ 阶线性系统(2).

针对系统(2),设计如下的LESO:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + l_1(x_1 - \hat{x}_1) \\ \vdots \\ \dot{\hat{x}}_{n-1} = \hat{x}_n + l_{n-1}(x_n - \hat{x}_{n-1}) \\ \dot{\hat{x}}_n = \hat{x}_{n+1} + l_n(x_n - \hat{x}_n) + b_0 u \\ \dot{\hat{x}}_{n+1} = l_{n+1}(x_1 - \hat{x}_1) \end{cases} \quad (3)$$

其中: $l_i, i=1, 2, \dots, n+1$ 为观测器增益参数^[9], b_0 为控制增益 b 的估计值.根据文[4],可按照下面的式(4)、式(5)式选取观测器增益参数:

$$[l_1 \ l_2 \ \dots \ l_{n+1}] = [\omega_o \alpha_1 \ \omega_o^2 \alpha_2 \ \dots \ \omega_o^{n+1} \alpha_{n+1}] \quad (4)$$

$$\alpha_i = \frac{(n+1)!}{i!(n+1-i)!} \quad (5)$$

可以将LESO的特征方程配置为如下形式:

$$\begin{aligned} \lambda_o(s) &= s^{n+1} + \omega_o \alpha_1 s^n + \dots + \omega_o^n \alpha_n s + \omega_o^{n+1} \alpha_{n+1} \\ &= (s + \omega_o)^n \end{aligned} \quad (6)$$

这种配置既能保证系统的稳定又可以给出较好的过渡过程,并且将原有的 $n+1$ 个增益参数简化为1个参数 ω_o ,称为观测器带宽.一般情况下 ω_o 的适应范围较广,容易调试出合适值.

2.2 误差反馈

当ESO可以实时观测出系统总扰动时,可以得到:

$$\hat{x}_{n+1} \approx x_{n+1} = f(y^{(n-1)}(t), \dots, y(t), w(t)) \quad (7)$$

将系统的控制量 u 按如下公式设计:

$$u = \frac{u_0 - \hat{x}_{n+1}}{b_0} \quad (8)$$

其中: u_0 为虚拟控制量, b_0 为补偿因子.将式(8)代入原系统(1)中,如果 $b_0 \approx b$,可将原系统近似转变为串联积分型系统:

$$y^{(n)}(t) = u_0(t) \quad (9)$$

针对新系统(9),采用如下的比例+高阶微分反馈控制律,就可以得到虚拟控制量 u_0 :

$$u_0 = k_1(r_1 - \hat{x}_1) + k_2(r_2 - \hat{x}_2) \dots + k_n(r_n - \hat{x}_n) + r_{n+1} \quad (10)$$

其中: $[r_1 \ r_2 \ \cdots \ r_n \ r_{n+1}] = [r \ \dot{r}_1 \ \cdots \ \dot{r}_{n-1} \ \dot{r}_n]$. $k_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为控制器增益参数. 例如对于 2 阶系统, 形式上类似于传统的 PD 控制, 此时 LADRC 需要确定的控制器参数总共只有 4 个: 即 k_1 、 k_2 、 b 、 ω_0 , 都有明确的物理意义, 非常便于工程应用时进行整定.

3 线性自抗扰控制理论分析

自抗扰控制由于不依赖于被控对象模型, 并具有较强的抗扰能力等特性, 因此适用范围广, 并具有很好的动态性能. 对这种先进控制方法的分析与综合就显得特别重要. 对自抗扰控制的理论研究主要围绕以下几个方面开展, 并取得了很多颇有价值的进展.

3.1 微分跟踪器 (TD) 的收敛性分析

微分信号在系统跟踪与控制中是非常重要的, 例如 PID 调节器中就需要系统的微分信号. 而通常利用差分法提取误差变化率时, 会产生噪声放大效应, 导致微分信号有可能被噪声淹没. 微分跟踪器 TD 最早是由韩京清教授在 1989 年提出的^[10], 并给出了初步的收敛性分析, 证明所建立的 TD 能够合理地提取系统的各阶微分^[5]. 在 ADRC 中, TD 主要用于安排输入指令信号的过渡过程以及反馈控制器中所需要的各阶微分信号. 以二阶系统为例, 韩京清教授设计了如下形式的线性跟踪微分器并进行了频域性能分析^[7-8].

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = -r^2(v_1 - v) - 2rx_2 \end{cases} \quad (11)$$

其中: v 为输入信号, v_1 为输入 v 的跟踪信号, v_2 为 v_1 的微分信号, r 为调节跟踪速度的参数. (11) 式的离散形式可以表示为^[6]

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + h_0 \cdot v_2(k+1) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + h_0 \cdot (-r^2(v_1 - v) - 2rx_2) \end{cases} \quad (12)$$

其中 h_0 为积分步长. 关于 TD 的设计的主要问题就是要保证其能够收敛到被跟踪信号的微分及高阶微分信号, 即保证 TD 的收敛性问题. 郭宝珠等提出了一种简单的线性 TD^[11], 证明了这种 TD 可在较小的随机扰动下跟踪任意可微信号时的收敛性, 并分析了其具有多项式级的收敛速率. 郭宝珠等在一定的附加条件下分析了韩京清提出的 (13) 式表示的一般形式的 TD 收敛性, 给出严格的收敛性证明^[12], 并将其成功地用于在线估计正弦信号有限和的未知频率. (13) 式包含了线性和非线性 TD.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = R^2 f\left(x_1 - v, \frac{x_2}{R}\right) \end{cases} \quad (13)$$

王新华和陈增强等在文^[13]中基于奇异摄动理论给出了一种有限时间收敛的微分器^[13]. 薛文超和黄一在文^[14]中分析了哪种系统可以用作 TD, 并证明了两种可用作 TD 的系统, 一种是半全有限时间稳定自治系统, 另一种更为普适的是那种经过确定性时间尺度变换后可与半全渐近稳定系统等价的系统.

3.2 扩张状态观测 (ESO) 的性能分析

对于一个实际受控的物理过程来说, 能否从它的输入

输出数据实时地估计出来其内部动态和外部扰动是一个对控制系统设计非常有意义的问题, 因为这个问题能够实现, 就意味着控制器的设计可以不需要系统的精确模型. 扩张状态观测器 ESO 是自抗扰控制的最为重要的组成部分, 它能够从观测数据中估计出系统的“总扰动”. 而 ESO 能否实现这一目标, 就需要分析其收敛性. Zheng 等在文^[15]中针对带有大的动态不确定性的 n 阶系统, 证明了 ESO 估计误差是有上界的, 并且随着其带宽的增加, 估计误差单减. 特别是在模型动态完全已知的情况下, 估计误差渐近趋于零. 该分析表明 ESO 可用于一大类具有不确定性的时变非线性系统的总扰动的估计.

ESO 既适用于连续光滑的不确定动态系统, 也适用于连续非光滑的不确定动态系统, 但是对此传统的观测器设计理论就不再适用于其收敛性分析. 黄一等在文^[16]中采用一种自稳定区域 (SSR) 方法, 这是一种非线性不确定系统的综合方法, 可用于 ESO 的设计与稳定性分析. 分析表明, ESO 的非平滑结构具有改进收敛性和估计精度的优势. 杨晓霞和黄一在文^[17]中讨论了 ESO 估计不确定性的能力, 给出了能被 ESO 观测并具有有界观测误差的扰动的范围, 并分别针对常值、正弦、斜波、方波等不同的干扰情况进行了分析, 表明 ESO 能处理多种类型的干扰.

郭宝珠等严格证明了针对一类含有不确定性的非线性系统的 ESO 的收敛性^[18], 并针对一类带有随机扰动的不确定三角非线性系统, 分析了 ESO 能够估计总扰动的收敛性^[19], 这里所说的总扰动包括了系统内部不确定非线性动态和所受的外部随机干扰.

3.3 LADRC 稳定性分析

3.3.1 LADRC 的收敛性与稳定性

Zheng 等分析了针对具有不确定性的非线性时变系统的 LADRC 的稳定性^[20], 这也是 LADRC 控制器稳定性的首次证明, 证明了在模型动态完全已知的情况下, 能够获得渐近稳定性; 当存在一定的模型不确定时, ESO 估计误差和控制器跟踪误差都是有上界的, 并且这些上界都是随着带宽降低而单减. 在此基础上, 文^[21]进一步分析了估计误差有界的条件下 LADRC 闭环控制系统输入输出有界 (BIBO) 稳定性. 薛文超等在文^[22]中分析了带有时变的非线性动态和不连续外扰信号的不确定对象的自抗扰控制器的性能, 明显地弱化了以前工作关于未确定性的假设条件, 并且定量地分析了 ESO 的带宽和闭环系统性能之间全时程关系, 给出了 LADRC 控制下指数稳定的条件. 文^[23]中获得的定理进一步表明了当干扰具有有限个不连续点的情况下, 系统跟踪误差的最终上界随着 LESO 的带宽增加而减少. 文^[24]中研究带有不确定动态和扰动条件下的三角型多输入多输出系统的控制问题. LADRC 的设计达到了如下两个目标: 一是闭环系统的收敛性, 二是通过调整 LESO 的带宽可使闭环系统的动态性能逼近参考指令系统.

3.3.2 基于奇异摄动理论的 LADRC 稳定性分析

Zhou 等运用奇异摄动理论来研究在模型动态未知、时变及非线性情况下 LADRC 的闭环稳定性^[25], 将 LADRC 控制下的闭环误差动态系统转化为奇异摄动系统, 然后基

于奇异摄动分析框架将闭环误差动态方程半解耦地分解成相对慢的子系统(反馈回路)和相对快的子系统(扩张状态观测器),然后基于复合李亚普诺夫函数方法进行稳定性分析,证明了在初始观测器误差充分小的条件下闭环系统是指数稳定的结论,并给出了观测器带宽所能容忍的下界. Shao 等在文[26]中进一步揭示了扰动变化率与估计误差大小的关系,指明总扰动的可微性是唯一需要的假设. 文[27]中研究了 ADRC 控制的鲁棒稳定性,先将系统转化为摄动间接 Lurie 系统,然后运用 Popov-Lyapunov 方法研究它的全局和局部稳定性,并且推导出控制器所能容忍的总扰动的鲁棒稳定界,最后阐述了如何将模型的线性动态集成到 ADRC 中以改善系统的动态性能和稳定特性.

3.3.3 基于频域的 LADRC 稳定性分析

LADRC 是一种有效的控制设计方法,但要在工程中推广应用,需要发展简单通用的参数整定方法. 而 PID 等传统控制器的最常用的参数整定方法是频域法. 基于闭环系统的频域图形(根轨迹图、伯德图、奈奎斯特图等)来整定参数,获得理想的幅频和相位特性. 一阶惯性加延迟系统是过程工业中的典型被控对象,文[28]对这一类典型过程的 LADRC 控制进行研究,以揭示出控制参数对系统稳定性和动态性能的影响. 首先通过对时延函数的泰勒逼近,给出一阶惯性加时延环节在 LADRC 控制下的闭环传函形式,并建立了 LADRC 控制下的闭环系统稳定的充分条件;然后利用这些条件将系统参数的摄动范围充分考虑进来,从而获得控制参数的允许区域. 因为幅值裕度和相角裕度常被用作系统鲁棒性的重要考量,并且相角裕度与系统阻尼密切相关,故可用作系统性能评价的一种标准. 利用系统参数的摄动区间,采用图形化方法精准地描述系统的鲁棒稳定边界,并根据预期的相角裕度和幅值裕度来确定控制器的参数. 该参数整定方法非常适合于一大类可用一阶时滞模型近似的实际对象的控制问题. Zheng 等对 ADRC 的在时间域上的算法描述和频率域上的性能理解做了深刻的阐述^[29].

徐琦等在文[30]中针对一阶惯性加延迟系统,将 ADRC 转化为内模控制(IMC)结构,导出了对应于互补灵敏度函数、乘性不确定性、控制器、滤波器的表达式,并利用频域的鲁棒稳定性判据,分析了 LADRC 的核心——ESO 的参数变化对闭环系统稳定性的影响. 总结出针对一阶惯性加延迟系统时 ESO 的参数整定准则. 数值仿真结果验证了所建立的准则之有效性. 这一分析方法也适用于被控对象能用传递函数描述的线性高阶含时滞系统.

针对 ADRC 的思想肇源探究及理论发展脉络梳理,是一件非常有意义的工作,吸引许多国内学者进行了深入的探索和总结^[31-33].

4 LADRC 的算法扩展与改进

在实际工程应用中,我们往往会遇到多变量耦合系统、串级系统、欠驱动非线性系统等复杂的控制系统,能够通过灵活地运用自抗扰控制技术进行控制器的设计而有效地加以解决. 而针对大时滞、非最小相位、观测器带宽

受限等典型控制难点问题,如何利用自抗扰控制思想来有效解决则具有重要的理论与实际意义. 本节着重介绍针对上述三类典型控制难点问题的 LADRC 的设计与改进方案.

4.1 大时滞系统

大时滞现象广泛存在于炼油、化工、冶金、制药、工业窑炉等流程工业过程当中,大时滞系统控制问题在自动化领域具有重要意义. 如何针对大时滞系统设计自抗扰控制器,韩京清教授等已经进行了深入的研究^[34-36],并给出如下四种解决思路.

方案 1 无视时滞法

无视时滞法即将时滞环节 $e^{-\tau s}$ 近似为 1 处理,产生的近似误差可以归结到系统的总扰动当中,充分利用 ADRC 的自抗扰能力来在一定程度上克服时滞的影响. 根据时滞时间的大小,需要适当调整补偿因子 b_0 ,观测器带宽参数 ω_0 . 该方法适用于系统时滞不是很大的情况,伴随时滞的增加,补偿因子将会成比例增大.

方案 2 提高阶次法

可将时滞环节近似为如下的一阶惯性环节:

$$e^{-\tau s} \approx \frac{1}{1 + \tau s} \quad (14)$$

这样通过提高系统的阶次,可将原来的时滞系统转化为更高阶的不含时滞系统后再进行控制器的设计. 该方法适用于系统原来阶次较低的情况.

方案 3 输出预估法

通过引入虚拟输出 y_0 ,将 u 到 y 之间有时滞的传递函数 $y = e^{\tau s} G(s) u$ 变换为 u 到 y_0 之间无时滞环节的传递函数:

$$y_0 = e^{\tau s} y = G(s) u \quad (15)$$

这里通过采用微分观测器 TD 实现微分预估,利用 TD 从输出量 y 计算出虚拟输出量 y_0 ,然后利用 u 和 y_0 设计自抗扰控制器.

方案 4 输入预估法

引入虚拟控制量 $U = e^{-\tau s} u$,使 U 和 y 之间变为无时滞环节,设计自抗扰控制器计算虚拟控制量 U ,再利用 TD 实现微分预估,得到系统实际控制量 u . 方案 3 和方案 4 均需要对系统的时滞较精确地已知.

以上关于在时滞系统中使用 ADRC 的方案也适用于 LADRC^[37]. 在文[38]中,一种降阶的 LADRC 实用方案被应用于热轧轧监控自动厚度控制大时滞系统,经过与常规的 Smith 预估器 + PID 控制器的方案进行数值仿真比较,抗扰性与鲁棒性都有明显改善,能耗指标显著降低.

Zheng 和 Gao 基于 Smith 预估器的思想来改进 ESO,并提出了时滞系统的预测 ADRC^[39]. 采用 Smith 预估器对提前预测过程输出以弥补大时滞系统中的信息延迟,获得一种兼具信息预估和总扰动主动补偿的预测型 ADRC. 基于频域方法分析了其鲁棒性与稳定性,并在化工过程和锅炉含氧量过程两个对象上进行了仿真和硬件在回路的实验. 唐德翠和高志强等采用预测自抗扰控制对待滤水浊度大时滞过程进行控制^[40],给出了大时滞系统的开环频率参数求取方法及简洁实用的控制参数整定公式,仿真比较结果表明预测 ADRC 具有良好的设定指令跟踪能力和抗扰动恢复

能力.

4.2 非最小相位系统

非最小相位系统是指传递函数中含有正实部零点的系统. 由于其阶跃响应会出现负调, 因而严重地影响了系统的稳定性与快速性. 为利用 LADRC 实现非最小相位系统超调及负调的抑制以及具有合适的调整时间. 赵申和高自强在文[41-42]给出了两种设计思路. 假设非最小相位系统如式(16)所示:

$$G(s) = \frac{b(c-s)}{s^2 + a_1s + a_2} \quad (16)$$

其微分方程可以表示为

$$\ddot{y} + a_1\dot{y} + a_2y = -b\dot{u} + bcu \quad (17)$$

思路 1 将式(17)通过求积分看成一阶系统, 如下式所示:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= -bu + bc\int u - a_1y - a_2\int y \\ &= b_0u + f\left(y, \int y, \int u\right) \end{aligned} \quad (18)$$

思路 2 将式(17)就看做二阶系统, 如下式所示:

$$\begin{aligned} y &= bcu - b\dot{u} - a_1\dot{y} - a_2y \\ &= b_0u + f(y, \dot{y}, \dot{u}) \end{aligned} \quad (19)$$

文中通过仿真发现思路 1 不能获得很好的闭环稳定性, 思路 2 虽能使系统稳定, 但系统调整时间过长, 并且观测器带宽参数取值范围较小. 针对思路 2 通过增大 b_0 , 增加补偿器的作用, 缩小了调整时间, 但系统的负调会增大.

薛文超等在文[43]采用状态空间分解方法, 将不确定非最小系统分解成为控制通道和输出通道两部分, 针对由能控标准型构成的控制通道 (不含有正实部零点), 使用 ESO 观测包括模型偏差在内的系统总扰动, 并将其补偿给控制输入, 以实现对于干扰的有效抑制. 而针对含有正实部零点的输出通道设计前馈控制器, 用于消除正实部零点的作用, 获得满意的动态跟踪性能. 同时文中也对 ESO 的收敛性和闭环系统的稳定性给出了理论证明. 孙立等在文[44]中进一步扩展了该方案, 将 LADRC 中的串联积分器用标称系统的能观标准型替代, 并对系统的稳定性进行了频域分析.

4.3 观测器带宽受限情形

ESO 是在 ADRC 应对各种不确定性的核心部分. 在 ESO 中, 提高观测器带宽可有效地改善控制器的跟踪性能^[33], 自抗扰控制器的稳定性在 ESO 观测器足够快 (观测器带宽足够大) 的情况下能够得以证明, 但在实际中这种假设条件是很难实现的. 因为带宽越大, 对执行机构和传感器的要求就越高从而导致成本增大, 同时会使系统对高频噪声更加敏感, 过快的观测器会严重引发系统振荡, 以致会导致系统不稳定, 因此观测器带宽通常都需要受限制. 当带宽受限时, 如何通过改进 ADRC 来提高系统的控制性能是一个重要的技术问题. Tatsumi 等在文[45-46]给出了相应的理论结果. 文中利用根轨迹法展示了闭环极点是如何随带宽变化而变化, 根据闭环极点的变化特点, 给出了三条改进建议:

(1) 通过在控制器与模型间加入 PI 形式的补偿器, 为系统增加一个原点处的极点, 同时抵消缓慢移动的极点, 从而使系统更接近理想的串联积分器形式.

(2) 通过设置原传递函数的逆函数抵消系统所有的零极点, 然后再将系统设置为串联积分器形式, 该方法要求原传递函数已知.

(3) 采用回路成形 (loop shape) 控制器取代原 ADRC 中的 PD 控制器, 提供足够的相位裕度确保系统的稳定.

李毅等在文[47]中针对典型一阶惯性环节, 在输入时延敏感性的框架下研究 ESO 带宽选择不当造成系统失稳的现象. 通过研究闭环特征多项式正根出现的情况, 定量地分析了 ESO 观测带宽、控制器参数和输入时延容忍度之间的关系, 使得参数整定能够兼具到 ESO 的观测精度与控制系统的鲁棒性能.

4.4 自抗扰广义预测控制 (ADRC-GPC)

广义预测控制 (GPC) 是 Clarke 等提出的一种先进模型控制算法. 它基于模型对过程输出进行前向多步预测, 并通过对在线滚动优化计算控制量, 具有很强的鲁棒性与适应性, 尤其适用于大时滞和变时滞过程, 并有很好的鲁棒性与控制性能, 因而广泛应用于过程工业中. 但 GPC 需要已知或建立系统的数学模型, 并在线求解丢番图方程组, 因此计算量很大, 限制了其应用范围, 难以在航空航天、机器人、电机系统等快速采样的过程中实现.

张园等将 ADRC 与 GPC 有机地结合起来, 提出了一种新型自抗扰广义预测控制器 (ADRC-GPC)^[48]. 利用 ADRC 中的 ESO 来估计和补偿系统的模型不确定性以及外扰作用, 将原始对象转化为串联积分器形式, 然后针对串联积分器设计 GPC, 可有效地解决 GPC 计算量大的问题, 而且该算法可直接应用于非线性被控对象的控制系统设计. 文[49-50]将 ADRC-GPC 算法应用于混沌系统的同步与控制, 验证了该方法可直接用于强非线性系统的控制器设计. 文[51]将该算法应用于强制循环蒸发系统, 仿真结果表明该方法适用于带有大时滞的多变量耦合系统. 文[52]将 ADRC-GPC 方案应用于四旋翼无人飞行器这一欠驱动非线性系统的姿态控制. 在实际装置中的实时控制结果表明, 文中所设计的 ADRC-GPC 可以满足控制精度及快速性的要求, 具有对非线性多变量耦合系统的解耦控制能力、以及很强的鲁棒性. 综上所述, ADRC-GPC 适用于具有大时滞、非线性、多变量耦合等控制难点的不确定系统, 具有良好的鲁棒性和动态跟踪性能.

5 工程应用

由于 LADRC 不仅保留了 ADRC 的不依赖于对象模型、抗干扰能力强的优势, 而且具有结构简单、容易实现、参数个数少且易于整定等特点, 因此在工程领域上得到了成功的推广应用^[53-54], 控制对象即包括化工、冶金、电厂等过程控制系统, 也包括机电、汽车、航海、航空航天等快采样的运动控制系统, 体现了很好的适应能力和工程应用前景. 下面仅举一些典型的应用案例加以说明.

5.1 在塑料挤出机过程中的应用

挤出机是塑料拉伸与成形工业中重要的前端设备,原料首先经过挤出机后获得一定的压力与温度后,将进入生产线的后续工序进一步拉伸成形。挤出机的温度控制不仅关系塑料产品的质量指标,而且具有重要的节能意义。高志强等将 LADRC 技术成功应用于北美某工厂的多条拉伸生产线的挤出机温度控制系统^[55],被控量为挤出机的 5 个桶区的温度,控制量为对应该桶区的电加热开关的占空比。由于 5 个桶区相连,因此各回路间存在着严重的耦合干扰;另外塑料原料的受热物理变化过程也存在着严重的非线性动态。采用 LADRC 技术后,不仅能够保持很好的控制精度和动态性能,而且由于计算的加热占空比动作更为合理,因此节能效果显著,实时控制统计数据表明,与 PID 控制比较,平均耗电量可降低 57%,节能降耗效果非常显著。

5.2 在典型化工过程中的应用

精馏塔和连续搅拌釜反应器是石油化工工厂中的重要设备,同时也是具有非线性,大时滞,大扰动、多变量强耦合的复杂控制对象。针对多变量耦合系统,在文^[56]中,Zheng 等基于 LADRC 框架,设计了一种独特的动态扰动解耦控制(DDC)策略,通过主动估计和补偿消除控制对象的内在动态和外部扰动,可以实现具有未知动态的多变量系统的解耦控制。稳定性分析结果表明估计误差和闭环跟踪误差都有界,并且误差上界随着 ESO 带宽增加而单调减少。在精馏塔和连续搅拌釜反应器这两种化工过程装置上的仿真结果表明,在对象含有很大的未知干扰和未建模动态情况下,所提出的控制器具有良好的性能。

5.3 在大型台车式热处理电阻炉控制系统的应用

大型台车式热处理电阻炉是冶金加热和机械锻压过程中的重要设备。该炉由炉门到炉底依次划分为 4 个炉区,对这 4 个炉区温度的控制效果,即影响产品的质量指标,也与电能的消耗密切相关。由于 4 个炉区相互连通,因此各回路间耦合干扰严重,并且存在严重的用电负荷波动等其它干扰。胡彬和孙青林等将 LADRC 技术在某工厂的多台大型台车式热处理电阻炉控制系统进行成功应用^[57]。研发了电气控制柜,以及控制系统硬件和软件平台,并在该平台上实现了 4 个回路的 LADRC 控制,经过现场不断调试和整定参数,实现了对大型台车式热处理电阻炉的高精度稳定运行。实时生产统计数据表明,在相同工况下线性自抗扰控制和工厂原有 PID 控制相比较每炉平均耗电量降低 12% 左右,因此节能降耗效果显著。

5.4 在发电机换热器中的应用

孙立和李东海将 LADRC 控制器应用到了大型发电机的换热器控制中^[58-59]。被控对象是一个 1 000 MV 大型火力发电机的换热器,被控量是换热器中冷凝液位高度,它需要保持一定值附近,液位过高或过低都会影响换热效率,严重了会造成发电机安全事故,控制量是调节阀位。这个控制过程存在着透平机气流量变化等多种大干扰,还具有较大时滞。在发电机的 DCS 系统上实现了 PID 与 ADRC 的无扰动切换,并实现了控制参数的自动整定,在现场实

时控制中取得了换热器液位良好的控制效果,保证了发电机组的高效安全运行。

5.5 在直流一直流功率转换器中的应用

Sun 和 Gao 为 1 kW 桥式直流一直流功率转换器设计了一种先进的数字控制器并在 DSP 上实现^[60]。该控制器采用 LADRC 方案,以处理转化器中存在的强非线性和外部扰动,并建立了基于带宽参数化和扰动量化技术的参数自动整定方法。实验结果表明这种 LADRC 控制方案对桥式直流一直流功率转换器具有很好的优势,当负载电流发生变化时,显示出了更好的扰动抑制能力。该功率转换器已被成功地应用于美国 NASA 的航天器的电源系统中。

5.6 在快速刀具伺服系统中的应用

快速刀具伺服系统(FTS)是实现非轴对称表面与非圆截面零件加工的关键部件,吴丹等根据该系统的特点设计了前馈控制加自抗扰控制的先进 FTS 控制器^[61-64],可实现刀具的高频高精度跟踪运动,并成功地完成了对发动机椭圆截面活塞和二维正弦微结构表面的精密车削。

5.7 在机电控制系统中的应用

在微机电系统(MEMS)领域,Zheng 等将 LADRC 技术应用于微机电陀螺仪和静电执行器两大微机电换能器^[65-66],能成功地补偿微机电制造上的缺陷并克服外部环境的扰动,有效地提高了微机电传感器和执行器的性能,增加了测量及移动精度。此外,还提出一种应用于微执行器的模型辅助自抗扰控制器,能够在外扰存在的情况下,显著地增大静电执行器的位移范围,显示了自抗扰技术在微机电领域的实用性与鲁棒性。聂卓赟等通过设计扩张状态观测器和状态反馈实现复杂条件下倒立摆系统的摆角控制,实验结果表明,自抗扰摆角控制能够克服实际系统存在的周期扰动、模型不确定性和间隙迟滞非线性输入端扰动这三类扰动影响因素对系统性能的影响,并保持良好的控制效果^[67]。针对永磁同步电机(PMSM)系统,滕青芳等采用矩阵变换器驱动方式,提出了基于 ADRC 的直接转矩控制策略^[68]。与 PI 控制的比较表明该策略具有更强的抗负载干扰能力和跟踪给定转速变化的能力。

5.8 在汽车发动机控制中的应用

谢辉等将 LADRC 技术在汽车发动机控制中进行应用,针对汽车发动机对运行工况的高度敏感性以及易受干扰等控制难点,将 LADRC 与基于模型的前馈控制和静态解耦控制相结合,设计了汽车发动机的合成控制策略,并应用于均匀气压点火(HCCI)发动机燃烧系统^[69]、发电机电液可变气门正时系统(VVT)^[70]、变几何涡轮增压器和废气再循环系统(VGT-EGR)^[71]。在发动机的不同负载和不同转速的情况下进行的试验,验证了所提出方案的鲁棒性和实用性。

5.9 在大口径深空探测天线伺服控制中的应用

大型测控天线主要服务于月球和深空探测工程中的航天器发射任务,要求其控制系统不仅要有很好的跟踪精度、较好的低速平稳性等动态性能,还应具有很强的可靠性与抗干扰能力。由于其体积巨大,风载荷干扰力矩是影响跟踪精度的关键因素。传统的 PID 控制器难以在复杂干

扰条件下达到满意的稳定控制效果. 文[72-73]报道了将 LADRC 成功应用于大口径深空探测天线伺服控制系统的结果. 在现有设备的技术条件下, 设计实现了大口径深空探测天线自抗扰控制系统. 为降低 ESO 的阶次, 将前向通道的惯性环节通过静态增益进行近似, 采用在线估计和补偿策略, 有力地抑制了强风载荷干扰对控制系统的不利影响; 基于描述函数法分析了包含摩擦特性的非线性系统的闭环性能, 说明所设计的控制方案可有效地避免极限环的产生. 实时控制结果表明, 控制超调比原有的 PID 系统减少了近 30%, 系统抗击阵风干扰能力提高了近 60%, 显著地减少了大幅超调造成的冲击所导致大口径天线反射面的变形. 在保护深空探测天线机械结构的同时, 也保证了跟踪指向精度的长期稳定.

5.10 在导弹飞行制导与控制系统中的应用

孙明玮等将 LADRC 技术应用于飞行控制系统实验转台^[74], 解决了转台无刷直流伺服系统的摩擦补偿问题. 以往研究中的摩擦补偿都是依赖于具体的摩擦模型, 适应性不足, 且摩擦补偿算法中对于速度测量或者估计信息的精度要求很高, 而基于此的补偿控制信号波动严重, 容易造成疲劳现象. 直接采用扩张状态观测器补偿则遇到摩擦不连续的问题, 低速情况下容易出现振荡. 该文中提出了基于指令补偿的无摩擦模型低速补偿策略, 在保留原有控制结构的框架下, 将对于摩擦力学的补偿转换为对于跟踪指令的补偿, 避免了对于摩擦模型和速度量测信息的依赖, 是一种非常实用的策略. 对于实践中发现的问题又进行了进一步研究, 得到了扩张状态观测器带宽与系统时延的鲁棒性关系, 并进行了定量分析. 该设计方案为工程上实现无模型和低精度角速度测量情况下的低速摩擦补偿提供了有效的方法支持.

孙明玮等采用 LADRC 技术研究导弹飞行制导控制^[75], 解决了在无视线角速度或低精度视线角速度并且不具备测距功能的被动导引情况下, 实现纵向精确的定点定向攻击, 实现了入射角度和命中精度协调统一的问题, 可以极大降低系统研制难度, 节约成本. 该控制方案经过了制导控制系统实验验证, 并进入实用阶段.

6 总结与展望

本文主要围绕着自抗扰控制理论与应用的发展进行了综述. 自抗扰控制是一种先进的工程控制方法和新型实用的控制技术. ADRC 采用 ESO 估计系统内部不确定性和系

统外部扰动, 并通过动态补偿使系统具有很好的适应性和抗扰动能力. 简化后的 LADRC 由于其结构简单, 便于理论分析、参数整定和工程实现而受到越来越多的中外同行关注. 目前自抗扰控制技术正处于一个蓬勃发展的上升阶段, 理论及应用的许多成果都在不断地涌现. 展望该领域未来的研究, 有如下方面需要进一步开展深层次工作:

(1) 自抗扰控制的深入理论分析

由于自抗扰控制是一种不依赖于对象模型的控制方法, 因此对其鲁棒稳定性分析就显得至关重要, 要深入探讨 ADRC 与 BOD、IMC、Backstepping 等控制方法的区别及内在联系, 要将频域法和时域法的稳定性分析方法相结合进行控制器的分析与设计. 其中重点关注相位变化对 ESO 和 ADRC 性能的影响.

ADRC 参数中的预估因子 b_0 , 虽然可以是一个比较粗略的估计, 但由于被控对象大多具有非线性和时变特性, 如何将 b_0 实时在线估计出来的工作有必要进一步开展. 对于 ESO, 为获得更精确的扰动估计值, 往往需要设置较高带宽 ω_o , 但高带宽会使观测器对噪声极为敏感. 如何增强观测器的滤波能力, 以及在带宽受限下如何获得更好的观测效果, 是今后研究当中的关键问题. 当被控对象的阶次未精确得知, 所设计 ADRC 控制器与实际模型阶次不相等时, 控制器的动态性能和闭环稳定性等问题需要进行深入细致的理论分析.

(2) 新型自抗扰控制器的设计

重点集中在过程工业中常用的大时滞系统和多变量耦合系统的自抗扰控制问题. 将多步预测控制技术用于大时滞系统的自抗扰控制. 将动态解耦技术结合到多变量系统自抗扰控制, 同时对运动控制(机器人、飞行器、车辆、倒立摆等)中的多自由度的欠驱动非线性控制系统给出满意的自抗扰控制方案.

(3) 自抗扰控制的推广应用

要加强自抗扰控制技术的产业化实现, 第一要加强自抗扰控制器在高速微处理器上的实现, 促进其在家用电器和电子测控仪器中的推广应用. 第二要加快开发在分布式控制系统 DCS 软件包上运行的自抗扰控制软件模块, 促进其在耗能严重的一些流程工业生产(石化、电力、冶金、建材等)的推广应用, 使 LADRC 成为实现节能降耗的低成本控制技术产品. 第三要着力推进自抗扰控制技术在航海、航天、航空、核能等重要领域的工程应用.

参考文献

- [1] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
Han J Q. Auto-disturbances-rejection controller and it's applications [J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.
- [2] 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 J Q. Active disturbance rejection control technique—the technique for estimating and compensating the uncertainties [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [3] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.
- [4] Gao Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]//Proceedings of the American Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 4989-4996.
- [5] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪—微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183.

- Han J Q, Wang W. Nonlinear tracking-differentiator[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 1994, 14(2): 177 – 183.
- [6] 韩京清, 袁露林. 跟踪—微分器的离散形式[J]. *系统科学与数学*, 1999, 19(3): 268 – 273.
Han J Q, Yuan L L. The discrete form of a tracking-differentiator[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 1999, 19(3): 268 – 273.
- [7] 韩京清, 黄远灿. 二阶跟踪—微分器的频率特性[J]. *数学的实践与认识*, 2003, 33(3): 71 – 74.
Han J Q, Huang Y C. Frequency characteristic of second-order tracking-differentiator[J]. *Mathematics in Practice & Theory*, 2003, 33(3): 71 – 74.
- [8] 黄焕袍, 万晖, 韩京清. 安排过渡过程是提高闭环系统“鲁棒性、适应性和稳定性”的一种有效方法[J]. *控制理论与应用*, 2001(S1): 89 – 94.
Huang H P, Wan H, Han J Q. Arranging the transient process is an effective method improved the “Robustness, adaptability and stability” of closed-loop system[J]. *Control Theory & Applications*, 2001(S1): 89 – 94.
- [9] 韩京清. 扩张状态观测器参数与非波纳奇数列[J]. *控制工程*, 2008(S2): 1 – 3.
Han J Q. Parameters of the extended state observer and Fibonacci sequence[J]. *Control Engineering of China*, 2008(S2): 1 – 3.
- [10] 韩京清. 控制理论—模型论还是控制论[J]. *系统科学与数学*, 1989, 9(4): 328 – 335.
Han J Q. Control theory: Model approach or control approach[J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Science*, 1989, 9(4): 328 – 335.
- [11] Guo B Z, Han J Q, Xi F B. Linear tracking-differentiator and application to online estimation of the frequency of a sinusoidal signal with random noise perturbation[J]. *International Journal of Systems Science*, 2002, 33(5): 351 – 358.
- [12] Guo B Z, Zhao Z L. On convergence of tracking differentiator[J]. *International Journal of Control*, 2011, 84(4): 693 – 701.
- [13] Wang X, Chen Z, Yang G. Finite-time-convergent differentiator based on singular perturbation technique[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2007, 52(9): 1531 – 1536.
- [14] Xue W, Huang Y, Yang X. What kinds of system can be used as tracking-differentiator[C]//*Proceedings of the 29th Chinese Control Conference (CCC2010)*. Piscataay, NJ, USA: IEEE, 2010: 6113 – 6120.
- [15] Zheng Q, Gao L Q, Gao Z. On validation of extended state observer through analysis and experimentation[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2012, 134(2): 024505.
- [16] Huang Y, Han J. Analysis and design for the second order nonlinear continuous extended states observer[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(21): 1938 – 1944.
- [17] Yang X, Huang Y. Capabilities of extended state observer for estimating uncertainties[C]//*Proceedings of 2009 American Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 3700 – 3705.
- [18] Guo B Z, Zhao Z. On the convergence of an extended state observer for nonlinear systems with uncertainty[J]. *Systems & Control Letters*, 2011, 60(6): 420 – 430.
- [19] Wu Z, Guo B. Extended state observer for uncertain lower triangular nonlinear systems subject to stochastic disturbance[J]. *Control Theory and Technology*, 2016, 14(3): 179 – 188.
- [20] Zheng Q, Gao L, Gao Z. On stability analysis of active disturbance rejection control for nonlinear time-varying plants with unknown dynamics [C]//*Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 12 – 14.
- [21] 陈增强, 孙明玮, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. *自动化学报*, 2013, 39(5): 574 – 580.
Chen Z Q, Sun M W, Yang R G. On the stability of linear active disturbance rejection control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(5): 574 – 580.
- [22] Xue W, Huang Y. On performance analysis of ADRC for nonlinear uncertain systems with unknown dynamics and discontinuous disturbances [C]//*Proceedings of 32nd Chinese Control Conference (CCC 2013)*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 1102 – 1107.
- [23] Xue W, Huang Y. Stability analysis of ADRC for nonlinear systems with unknown dynamics and disturbance[M]//*Theory and Applications of Complex Systems and Robust Control*. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [24] Xue W, Huang Y. The active disturbance rejection control for a class of MIMO block lower-triangular system[C]//*Proceedings of 30th Chinese Control Conference (CCC 2011)*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 6362 – 6367.
- [25] Zhou W, Shao S, Gao Z. A stability study of the active disturbance rejection control problem by a singular perturbation approach[J]. *Applied Mathematical Sciences*, 2009, 3(10): 491 – 508.
- [26] Shao S, Gao Z. On the conditions of exponential stability in active disturbance rejection control based on singular perturbation analysis[J]. *International Journal of Control*, published on line 2016, DOI: 10.1080/00207179.2016.1236217.
- [27] Qi X H, Li J, Xia Y Q, et al. On the robust stability of active disturbance rejection control for SISO systems[J]. *Circuits Systems and Signal Process*, 2016, DOI 10.1007/s00034 – 016 – 0302 – y.
- [28] 杨瑞光, 线性自抗扰控制的若干问题研究[D]. 天津: 南开大学, 2011.
Yang R G. On the stability of linear active disturbance rejection control[D]. Tianjin: Nankai University, 2011.
- [29] Zheng Q, Gao Z. Active disturbance rejection control: Between the formulation in time and the understanding in frequency[J]. *Control Theory and Technology*, 2016, 14(3): 250 – 259.
- [30] 徐琦, 孙明玮, 陈增强, 等. 内模控制框架下时延系统扩张状态观测器参数整定[J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1641 – 1645.
Xu Q, Sun M W, Chen Z Q, et al. Extended state observer tuning for time-delay systems in the framework of internal model control[J]. *Con-*

- rol Theory & Applications, 2013, 30(12): 1641–1645.
- [31] Guo L, Cao S. Anti-disturbance control theory for systems with multiple disturbances: a survey[J]. ISA transactions, 2014, 53(4): 846–849.
- [32] 黄一, 薛文超. 自抗扰控制: 思想, 应用及理论分析[J]. 系统科学与数学, 2012, 32(10): 1287–1307.
Huang Y, Xue W C. Active disturbance rejection control: Methodology, applications and theoretical analysis[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Science, 2012, 32(10): 1287–1307.
- [33] 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 Z Q. On the foundation of active disturbance rejection control [J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1498–1510.
- [34] 韩京清, 张文革. 大时滞系统的自抗扰控制[J]. 控制与决策, 1999, 14(4): 354–358.
Han J Q, Zhang W G. ADRC control for large time-delay systems [J]. Control and Decision, 1999, 14(4): 354–358.
- [35] 夏元清, 黄焕袍, 韩京清. 不确定时滞系统 ADRC 控制[J]. 中南工业大学学报, 2003, 34(4): 383–385.
Xia Y Q, Huang H P, Han J Q. ADRC control of uncertain systems with time-delay [J]. Journal of Central South University, 2003, 34(4): 383–385.
- [36] 韩京清. 时滞对象的自抗扰控制[J]. 控制工程, 2008, 15(S2): 7–10.
Han J Q. Auto-disturbances rejection control for time-delay systems[J]. Control Engineering of China, 2008, 15 (S2): 7–10.
- [37] 王丽君, 李擎, 童朝南, 等. 时滞系统的自抗扰控制综述[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1521–1533.
Wang L J, Li Q, Tong C N, et al. Overview of active disturbance rejection control for systems with time-delay[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1521–1533.
- [38] 王丽君, 童朝南, 李擎, 等. 实用自抗扰控制在大时滞厚度自动监控系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(3): 368–374.
Wang L J, Tong C N, Li Q, et al. Practical active disturbance rejection solution for monitoring automatic gauge control system with large time-delay[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(3): 368–374.
- [39] Zheng Q, Gao Z. Predictive active disturbance rejection control for processes with time delay[J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 873–881.
- [40] 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[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(1): 102–108.
Tang D C, Gao Z Q, Zhang X H. Design of predictive active disturbance rejection controller for turbidity[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(1): 102–108.
- [41] Zhao S, Gao Z. Active disturbance rejection control for non-minimum phase systems[C]//Proceedings of the 29th Chinese Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 6066–6070.
- [42] Zhao S. Practical solutions to the non-minimum phase and vibration problems under the disturbance rejection paradigm[D]. Cleveland: Cleveland State University, 2012.
- [43] Xue W, Huang Y, Gao Z. On ADRC for non-minimum phase systems; Canonical form selection and stability conditions[J]. Control Theory and Technology, 2016, 14(3): 199–208.
- [44] Sun L, Li D, Gao Z, et al. Combined feedforward and model-assisted active disturbance rejection control for non-minimum phase system[J]. ISA Transactions, 2016, 64: 24–33.
- [45] Tatsumi J, Gao Z. On the enhanced ADRC design with a low observer bandwidth[C]//Proceedings of 32nd Chinese Control Conference (CCC 2013). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2013: 297–302.
- [46] Tatsumi J. On the analysis and design of disturbance rejecter[D]. Cleveland: Cleveland State University, 2013.
- [47] Li Y, Sun M W, Wang Z H, et al. Quantitative analysis of critical limitation in using extended state observer[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2016, 14(3): 1–7.
- [48] 张园, 孙明玮, 陈增强, 等. 基于扩张状态观测器的广义预测控制[J]. 系统科学与数学, 2014, 34(11): 1366–1378.
Zhang Y, Sun M W, Chen Z Q, et al. Generalized predictive control algorithm based on extended state observer[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Science, 2014, 34(11): 1366–1378.
- [49] 张园, 徐琦, 孙明玮. 基于快速全线性预测控制的混沌系统控制与同步[J]. 物理学报, 2015(1): 55–61.
Zhang Y, Xu Q, Sun M W. Control and synchronization in chaotic systems based on fast linear predictive control[J]. Acta Physica Sinica, 2015(1): 55–61.
- [50] Zhang Y, Sun M W, Chen Z Q. Unified linear time-invariant model predictive control for strong nonlinear chaotic systems[J]. Nonlinear Analysis: Modelling and Control, 2016, 21(5): 587–599.
- [51] 张园, 孙明玮, 陈增强. 强制循环蒸发系统线性自抗扰解耦控制的鲁棒设计[J]. 化工学报, 2015, 66(S2): 263–270.
Zhang Y, Sun M W, Chen Z Q. Robust design of linear active disturbance rejection decoupling control for forced-circulation evaporation[J]. Journal of Chemical Industry, 2015, 66(S2): 263–270.
- [52] 陈增强, 李毅, 孙明玮, 等. 四旋翼无人飞行器 ADRC-GPC 控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(9): 176–180.
Chen Z Q, Li Y, Sun M W, et al. ADRC-GPC control of a quad-rotor unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(9): 176–180.
- [53] Zheng Q, Gao Z. On practical applications of active disturbance rejection control[C]//Proceedings of the 29th Chinese Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 6095–6100.
- [54] Huang Y, Xue W C, Gao Z Q, et al. Active disturbance rejection control: Methodology, practice and analysis[C]//Proceedings of the 33rd

- Chinese Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 1–5.
- [55] Zheng Q, Gao Z. On practical applications of active disturbance rejection control [C]//Proceedings the 29th Chinese Control Conference (CCC2010). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 2503–2508.
- [56] Zheng Q, Chen Z, Gao Z. A practical approach to disturbance decoupling control[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(9): 1016–1025.
- [57] Hu B, Ying X K, Sun Q L, et al. Linear active disturbance rejection solution for heat treatment resistance furnace [C]//Proceedings the 2014 Chinese Control Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014.
- [58] Sun L, Li D, Hu K, et al. On Tuning and practical implementation of active disturbance rejection controller; A case study from a regenerative heater in a 1000 MW power plant[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016.
- [59] Sun L, Dong J, Li D, et al. A practical multivariable control approach based on inverted decoupling and decentralized active disturbance rejection control[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(7): 2008–2019.
- [60] Sun B, Gao Z. A DSP-based active disturbance rejection control design for a 1-kW H-bridge DC-DC power converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(5): 1271–1277.
- [61] Wu D, Chen K, Wang X. Tracking control and active disturbance rejection with application to noncircular machining [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(15): 2207–2217.
- [62] Wu D, Chen K. Design and analysis of precision active disturbance rejection control for noncircular turning process[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7): 2746–2753.
- [63] Wu D, Zhao T, Chen K, et al. Application of active disturbance rejection control to variable spindle speed noncircular turning process[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(5): 419–423.
- [64] 吴丹, 赵彤, 陈恳. 快速刀具伺服系统自抗扰控制的研究与实践[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1534–1542.
Wu D, Zhao T, Chen K. Research and industrial applications of active disturbance rejection control to fast tool servos[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1534–1542.
- [65] Zheng Q, Dong L, Lee D H, et al. Active disturbance rejection control for MEMS gyroscopes[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(6): 1432–1438.
- [66] 董莉莉. 自抗扰控制技术在微机电换能器中的应用[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1543–1552.
Dong L L. Application of active disturbance rejection control to micro-electro-mechanism system transducers [J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1543–1552.
- [67] 聂卓赟, 刘瑞娟. 复杂条件下倒立摆摆角控制设计与实验研究[J]. 信息与控制, 2016, 45(4): 506–512.
Nie Z Y, Liu R J. Inverted pendulum angle control design and experimental studies under complex conditions[J]. Information and Control, 2016, 45(4): 506–512.
- [68] 滕青芳, 王传鲁, 李姝媛. 基于自抗扰速度调节器的矩阵变换器驱动永磁同步电机直接转矩控制[J]. 信息与控制, 2016, 45(6): 691–698.
Teng Q F, Wang C L, Li S Y. Direct torque control for permanent magnet synchronous motors driven by matrix converter based on the speed regulator of the active disturbance rejection technique [J]. Information and Control, 2016, 45(6): 691–698.
- [69] Song K, Xie H, Li L, et al. Disturbance observation and rejection method for gasoline HCCI combustion control[R]. SAE Technical Paper, 2013.
- [70] Xie H, Song K, He Y. A hybrid disturbance rejection control solution for variable valve timing system of gasoline engines[J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 889–898.
- [71] Xie H, Song K, Yang S, et al. Model-based decoupling control of VGT and EGR with active disturbance rejection in diesel engines[J]. Advances in Automotive Control, IFAC Proceedings, 2013, 46(21): 282–288.
- [72] Qiu D M, Sun M W, Wang Z H, et al. Practical wind disturbance rejection for large deep space observatory antenna[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2014, 22(5): 1983–1990.
- [73] 孙明玮, 邱德敏, 王永坤, 等. 大口径深空探测天线的抗风干扰伺服系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1568–1575.
Sun M W, Qiu D M, Wang Y K, et al. Wind disturbance rejection servo system for large deep space observatory antenna[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(6): 1568–1575.
- [74] Sun M W, Wang Z H, Wang Y K, et al. On low-velocity compensation of brushless dc servo in the absence of friction model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 3897–3905.
- [75] Sun M W, Xu Q, Du S Z, et al. Practical solution to impact angle control in vertical plane[J]. AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014, 37(3): 1022–1027.

作者简介

陈增强(1964–), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域为自抗扰控制, 模型预测控制, 智能控制.

程 赟(1990–), 男, 博士生. 研究领域为自抗扰控制, 多变量解耦控制.

孙明玮(1972–), 男, 博士, 教授, 硕士生导师. 研究领域为自抗扰控制, 模型预测控制, 飞行器制导优化与控制.

孙青林(1963–), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域为自抗扰控制, 模型预测控制, 伞翼飞行器建模与控制.