

文章编号: 1000-8152(2002)04-08-0485

自抗扰控制器的发展*

黄 一¹, 张文革²

(1. 中国科学院 数学与系统科学研究院 系统科学研究所, 北京 100080; 2. 中国农业大学 电气信息学院, 北京 100083)

摘要: 以自抗扰控制器的发展为线索, 对其所蕴涵的新思想做一个系统的阐述, 并总结了在自抗扰控制器的研究过程中提出的一些有待解决的新课题.

关键词: 反馈系统; 经典调节理论; 跟踪微分器; 扩张状态观测器; 自抗扰控制器

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Development of active disturbance rejection controller

HUANG Yi¹, ZHANG Wen-ge²

(1. Institute of Systems Science, Academy of Mathematics and Systems Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Electricity & Information College, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: The main ideas, which promote the development of active disturbance rejection controller (ADRC), are systematically introduced. At the same time, the new theoretical problems, which have been put forward during the researches on ADRC are concluded.

Key words: feedback systems; classical regulation theory; tracking differentiator (TD); extended state observer (ESO); active disturbances rejection controller(ADRC)

1 引言(Introduction)

自抗扰控制器(active disturbance rejection controller, ADRC)从其设计思想源头至今已经历了 20 年风风雨雨的曲折发展过程,如今自抗扰控制器在控制界已具有一定知名度,不少人被其独特的控制思想及卓越的控制品质所吸引,积极致力于在尖端科技领域的应用,也有不少人尚对其将信将疑.笔者认为自抗扰控制器实际上是在不断探索过程中萌发的一系列突破传统观念与方法的新思想的结晶,与结果相比,这些思想火花更具有启发性.本文希望围绕自抗扰控制器的发展,对其所蕴涵的新思想做一个系统的阐述.

2 反馈系统中的线性与非线性(Linearity and non-linearity in feedback systems)

追根溯源,自抗扰控制器的发展始于一篇讨论如何统一处理线性系统的结构和反馈系统计算问题的论文中的一个重要结论:一个系统的积分器串联型结构不仅是线性系统在反馈变换下的标准结构,也是一类非线性系统在线性反馈变换下的标准结构^[1].清华大学几位学者以此结论为基础,经过深入研究,从理论上将它推广到对更为广泛的一类非线性系统进行反馈控制律设计的可能性.他们将这种设计反馈律的方法称为直接反馈线性化(DFL)方法,实质上就是通过设计恰当的反馈输入来补偿对象的非线性,使之成为积分串联型线性系统进而再进行反馈律设计,并用 DFL 理论

圆满地解决了电力系统非线性励磁控制器和静止无功补偿器的设计问题^[2-6].1994 年以来,利用 DFL 理论的微机非线性励磁控制器在山东龙口电厂,平度热电厂,山东滨州化工厂,江苏扬农化工集团有限公司,山东省航天发泡剂总厂,山东济宁中银电化有限公司的成功投运成为这一新思想最突出的应用成果^[6].

逆系统方法^[7,8]及基于微分几何理论的反馈线性化方法^[9]的本质都是将非线性系统通过非线性反馈解耦成积分器串联型结构,与 DFL 可谓异曲同工,殊路同归.但难能可贵的是文[1]写于 70 年代末 80 年代初,当时我国对国际上的研究动态基本处于封闭的状态,文[1]的思想因其简单直观而使以此建立的 DFL 方法让工程师们切身地领会了非线性系统并非如此可怕,非线性控制可以如此简单地运用.

文[10]将文[1]思想进一步深化为对线性系统与非线性系统关系的探讨,作者认为人们头脑中的线性和非线性的概念大都来自于没有控制输入的经典力学系统.在经典力学系统中,人们关心的是描述和解释轨线分布的拓扑结构,对没有输入、输出的封闭系统来说,线性系统和非线性系统具有完全不同的拓扑结构,两者不能任意转化.然而控制系统具有经典力学系统所没有的新结构——控制输入和反馈,是一个开放系统.控制系统中的反馈作用能够破坏原系统中的大部分拓扑结构,又能建立起全新的拓扑结构.在状态反馈作

* 基金项目:国家自然科学基金(69904010)资助项目.

收稿日期:2000-07-28; 收修改稿日期:2001-09-13.

用之下,控制系统中不变的性质几乎只剩下几个积分器和联结它们的信息通道,此外其他性质几乎可以随意设置.因此,控制系统中的反馈作用打破了经典动力系统意义下的线性和非线性的界限,反馈能够把线性转化为非线性,也可以把许多非线性转化为线性.从反馈控制的角度看,我们不应该再按经典意义把控制系统分成线性和非线性系统,对能控的线性系统可以用状态反馈设置一些非线性特性.针对当时学术界对非线性系统如临大敌的现状,作者提出了“抛弃线性和非线性的旧观念,发挥反馈威力”对付非线性控制系统问题的新观念.文[11~13]都是为阐述这一观念而作.虽然这些文章中并没有给出严谨的理论证明,但这一观念为突破长期以来固化的一些思想框架具有十分重要的意义.

这种对“非线性”无所畏惧的思想使得韩京清研究员主动地考察在控制系统设计中引入一些非线性环节的效果,发现有些非线性环节具有线性结构所没有的好品质.如果说文[11,12]还注重于阐述如何将系统中的非线性环节视做反馈作用,从而可以套用常用的线性设计手段进行极点配置或观测器设计,文[13~15]则进一步萌发出“用配置非线性结构替代极点配置”进行控制系统设计的思想.这一主动在系统中引入非线性的想法完全不同于通常人们遇到非线性先想法将其线性化的思路.文[14,15]分别引入了两个非线性环节来说明这一思想:

1) 文[14]命题4: 设 $y_0(t)$ 二次连续可微, $x_1(t)$ 是满足微分方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -M \operatorname{sgn}(x_1 - y_0(t) + \frac{x_2 |x_2|}{2M}) \end{cases} \quad (1)$$

的解.这时,对任给的 $\epsilon > 0$ 及 $T > 0$,必有 $M_0 > 0$,使得当 $M > M_0$ 时,有

$$\int_0^T |x_1(t) - y_0(t)| dt < \epsilon.$$

若把 $y_0(t)$ 视为系统(1)的参考输入,其响应 $x_1(t)$ 跟踪 $y_0(t)$ 的效果又快又没有超调.即使 $y_0(t)$ 为分段连续的情形, $x_1(t)$ 跟踪 $y_0(t)$ 的品质也很好.众所周知,在二阶线性系统中,超调与快速性是一对无法调和的矛盾,0.707的阻尼比是两者折中的最好效果.式(1)中函数

$$\operatorname{sgn}(x_1 - y_0(t) + \frac{x_2 |x_2|}{2M}) \quad (2)$$

实际上来自于时间最优综合函数.文[16]则用“自稳定域”理论进一步论证了具有快速无超调特性的非线性结构的更一般形式.

2) 文[15]对非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2), \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2, c), \\ y = x_1. \end{cases} \quad (3)$$

其中 c 是未知参数,设计了一个具有“非线性输出误差校正”

结构的观测器

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -\beta_{01} \operatorname{fal}(z_1 - y, \alpha, \delta) + f_1(y, z_2), \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02} \operatorname{fal}(z_1 - y, \alpha, \delta) + f_2(y, z_2, z_3), \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03} \operatorname{fal}(z_1 - y, \alpha, \delta) \end{cases} \quad (4)$$

来估计系统(3)的状态及未知参数 c . 其中

$$\operatorname{fal}(x, \alpha, \delta) = \begin{cases} |x|^\alpha \operatorname{sgn}(x), & |x| > \delta, \\ x/\delta^{1-\alpha}, & |x| \leq \delta, \end{cases} \quad \delta > 0, \quad (5)$$

这里对观测器不是配置极点,而是配置非线性结构(5).数值仿真表明这种非线性观测器的跟踪能力很强.

非线性函数(5)(当 $0 < \alpha < 1$ 时)实际上是对控制工程界的一个经验知识:“大误差,小增益;小误差,大增益”的数学拟合(见图1).模糊控制,智能控制,变增益PID等方法,本质上都是基于这种经验知识,而式(5)则用一简单的非线性结构描述了这一经验知识.式(5)成为后来常用的非线性反馈结构,文[17,18]从非线性反馈效应的角度进一步阐述了这种结构的鲁棒性和适应性.

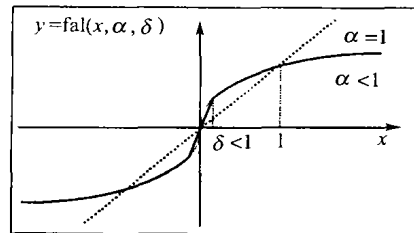


图1 非线性函数(5)的数学拟合示意图

Fig. 1 The diagram of nonlinear function (5)

从此之后,韩京清研究员在多篇文章中大力倡导“开发利用非线性特性”设计控制器,并身先士卒地致力于寻找更好的非线性特性,以设计出效率更高的控制器.至此,“控制系统的非线性设计方法”的思想已基本形成,系统(1)进一步发展完善成非线性跟踪微分器(TD)理论和设计方法,而系统(4)已具有非线性扩张状态观测器(ESO)的雏形.TD,ESO和非线性反馈结构正是自抗扰控制器的三个重要组成部分.

非线性特性(2),(5)的一个共同特点是具有“非光滑”性^[19],目前,非线性(非光滑)系统的研究,无论是理论分析还是设计,依然是控制学科中引人注目而又困难重重的课题.

如果说“开发利用非线性特性”的思想及由此开发的非线性功能单元为“自抗扰控制器”奠定了物质基础,那么,在文[14]对模型论与控制论这一更为基本和富有挑战性的问题的探讨中,则形成了“自抗扰控制器”的基本结构框架为不依赖于对象模型,基于过程误差来消除误差的非线性控制结构.

3 模型论与控制论(Model theory and cybernetics)

1986年,韩京清研究员与黑龙江大学韩志刚教授,南开大学涂葦生教授在天津碰面,有感于现代控制理论虽然理论结果完美却提不出象PID那样能普遍应用的成果,达成了寻求工程实用控制器的共识.天津聚会之后,作为一个多年致

力于现代控制理论研究并取得突出成就的学者,韩京清研究员在文[14]中却勇于以批判的态度反思现代控制理论的发展现状,把现代控制理论时期称为控制理论发展史中的“模型论”时期,无论是线性系统还是非线性系统,无论是状态空间法还是频域法,系统的数学模型已成为分析与设计的出发点或建模与辨识的归宿.许多致力于现代控制理论的学者,曾期望用新的成果与方法取代 PID 调节器,且把当时控制工程界中仍采用 PID 调节器的现象归结为控制工程界的知识结构问题.然而依靠模型建立控制律的方法,在控制工程中遇到了很大的挑战,鲁棒性是首当其冲的大问题.为此,作者在文中剖析了经典调节理论和导引理论建立控制律的基本思想,既不完全依靠系统的数学模型,而是靠期望轨迹与实际轨迹的误差的大小和方向来实施,是一种基于过程误差来抑制或消除误差的方法.并从“全局结构与过程控制”的角度进一步分析了基于模型的方法与基于过程误差的方法的不同之处,指出控制系统的许多结构性质,如能控性,能观性,抗干扰性,解耦性,稳定性等,都与系统的数学模型关系密切,研究这些性质就得靠对象的数学模型.现代控制理论正是把数学模型分析中所得的这些全局结构性质的结果应用于控制系统设计上,如极点配置,反馈线性化,逆系统方法等,因此常常是把状态变量的函数当作反馈量.但是,近代导引理论中的控制律,通常不是纯粹状态变量的函数而是由系统的某些实时变量和由他们作出的对某些变量的估计值的组合来实现.文中以一个简单的例子来说明这个问题.对如下的一个二阶系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + u, \\ y = x_1, \end{cases} \quad (6)$$

要选 u 使 $y(t)$ 达到某种形式,不一定要弄清函数 $f(x_1, x_2)$ 本身是什么,只要能获取该函数随时间变化的量

$$a(t) = f(x_1(t), x_2(t)) \quad (7)$$

就可以了.因此从控制的目的来看,当 $f(x_1, x_2)$ 未知时,不用去辨识函数 $f(x_1, x_2)$ 本身是线性还是非线性,时变还是时不变,只要估计好 $a(t)$ (甚至不去估计)就可以了.从这种意义上讲控制的目的是控制好一个过程,全局结构性质为控制好过程提供可行性指导.

文[14]及其后的一系列文章^[20,21]进一步从思想方法上分析了“经典 PID 的合理之处在于综合误差的过去 ($I(\int_0^t e dt)$), 现在(P)及将来(D)的行为设计反馈律,其控制机理完全独立于对象的数学模型”.这是 PID 在过程控制中能够得到大量应用的根本原因.然而,它生成控制量的方法,由于受当时的认识水平和技术条件的限制,比较简单地处理“目标和实际行为之间的误差”来得到控制量. PID 的局限性就是由这种“简单处理”所导致的,而现代控制理论虽然对系统分析(即对控制系统基本机制的认识)作出了很大贡献,提

高了人们对控制系统的认识,但是由于大量的工程对象给不出合适的数学模型,它提出的控制方法很难得到实际应用.因此,“靠模型”是其优点,也是最大“缺点”——无法实用.

通过对 PID 和现代控制理论优缺点的分析认识,“将现代控制理论对控制系统的认识和现代的信号处理技术相结合,汲取经典 PID 的思想精华,构造新型实用控制器”的思想逐步形成,于是,自抗扰控制器的形成进入实质性阶段.

正是这种勇于对自己的研究工作进行深刻反省批判并积极认真汲取其他研究成果精华的态度,使得文[14,20,21]对经典调节理论优点的分析及缺点的剖析都触及问题本质而非流于表面,这也决定了自抗扰控制器不只是停留在对 PID 进行一些修修补补的工作,而是一次对经典调节理论的脱胎换骨的革新.

至此之后,我们可以把自抗扰控制器的形成分为两个阶段.

3.1 跟踪微分器的产生及新型非线性 PID(Tracking differentiator and new nonlinear PID)

如前所述,自抗扰控制器的产生是从改进 PID 开始的.那么,经典 PID 有那些地方需要改进呢?文[14,18,20,21]在剖析经典 PID 的思想精华的同时,认真分析了经典 PID 由于对“目标信号”和“实际行为信号”的处理过于简单而导致的一些不足之处,一个突出问题是如何从给定信号中合理提取微分信号,这个问题在经典 PID 中主要表现在:参考输入 $v(t)$ 常常不可微,甚至不连续,而输出信号 $y(t)$ 的量测又常被噪声污染.因此,误差信号 $e(t) = v(t) - y(t)$ 按经典意义通常不可微或其微分信号被噪声的导数淹没^[22].经典 PID 中一般采用差分或超前网络近似实现微分信号,这种方式对噪声放大作用很大,使微分信号失真而不能使用.

众所周知,“微分器物理不可实现”是控制界的一道“紧箍咒”.对经典意义下的“微分”来说,确实有一定的道理.那么,有没有非经典意义定义的微分呢?控制论的鼻祖 N. Wiener 在 20 年代曾用“积分”来定义过“分数次微分”.这种手法后来发展成为“广义函数”及“广义导数”理论,应用于偏微分方程理论中.文[22]也介绍了在计算机仿真中以积分的方式求取高阶微分的办法.

回顾形如式(1)的系统当 $y_0(t)$ 为阶跃输入时, $x_1(t)$ 可以快速而无超调地跟踪 $y_0(t)$,而 $x_2(t) = \dot{x}_1(t)$ 则反映了信号 $y_0(t)$ 的微分信息,且 $x_2(t)$ 是以积分方式得到的,可以有效抑制信号 $y_0(t)$ 中的噪声.于是,以系统(1)为基础,一种能够有效提取微分信号的非线性动态环节——“跟踪微分器(tracking differentiator, TD)”诞生了.

所谓“非线性跟踪微分器”是这样—个非线性动态环节^[23-25]:对它输入一个信号 $v(t)$,它将给出两个输出 $v_1(t)$ 和 $v_2(t)$,其中 $v_1(t)$ 跟踪输入信号 $v(t)$,而 $v_2(t)$ 是 $v_1(t)$ 的微分. $v_2(t)$ 实际上是 $v(t)$ 的“广义微分”,是一种“品质”很好的微分.

文[21,22]在经典PID中引入了两个TD(见图2),TD1用于根据控制目标 $v(t)$ 和对象的能力,安排合适的过渡过程 $v_1(t)$ 和这个过程的微分信号 $v_2(t)$,TD2则用于获取量测信号 $y(t)$ 的滤波输出 $y_1(t)$ 及量测信号中的微分信息 $y_2(t)$ 。然后,再用 $v_1(t) - y_1(t)$ 生成误差信号 $e(t)$, $v_2(t) - y_2(t)$ 则形成误差的“微分信号” $\frac{de(t)}{dt}$ 。

PID的第二大缺陷在于简单地采用了误差的比例,微分及积分的“线性加权和”形式,这种线性配置不易解决快速性和超调的矛盾,受前面介绍的对非线性反馈结构(5)的优越性研究的启发,采用误差的过去($I(\int_0^t e dt)$),现在(P)及将来(D)信息的非线性反馈结构,即

$$u = K_1 |e_0|^{\alpha_1} \text{sgn}(e_0) + K_P |e_1|^{\alpha_P} \text{sgn}(e_1) + K_D |e_2|^{\alpha_D} \text{sgn}(e_2),$$

$$e_0 = \int_0^t e(t) dt, \quad e_2 = \frac{de(t)}{dt}$$

替代经典的“线性加权和”形式却能极大地提高信息处理的效率,特别是有了计算机后,非线性特性的实现易如反掌。

于是,一种新型非线性PID控制器诞生了!

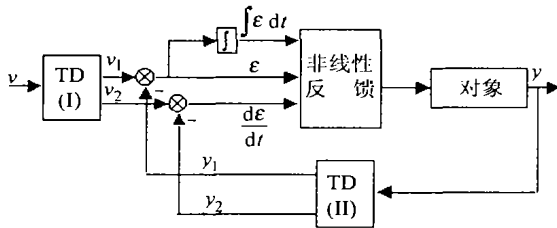


图2 非线性PID结构
Fig. 2 Nonlinear PID structure

如前所述,跟踪微分器TD的发明是新型非线性PID的一个重要基础.跟踪微分器的发明提出了许多有意义的新课题:

1) TD的出现将对控制理论的基础“微分器物理不可实现”产生什么影响?现代控制理论正是被这一禁令所束缚,要求控制器分子的次数不能高于分母的次数.由于不能简单地提取微分信号,而不得不依靠“数学模型”作许多“辅助性作业”来提取状态变量信息.如果允许使用“微分器”,不必为提取所需信息而依靠“数学模型”,那么控制理论的发展将会呈现怎样的全新局面。

2) 式(1)为右端不连续微分方程,不满足Lipschitz条件,即一般微分方程理论的解的存在唯一性条件,因此,建立非线性跟踪微分器理论需要发展右端不连续微分方程理论,包括解的存在性及解的单向存在唯一性理论,(因为在控制系统中,时间是单向流逝的,因此,并不需要动态系统的解具有双向存在唯一性).从提出TD理论至今,这方面的工作持续了近十年。

3) 文[23]提出的几种TD结构在数值计算时往往产生高频颤振,为解决这一问题,文[24]用离散方法直接处理形

如式(1)结构的TD,利用“等时区概念”^[26]构造出能快速无超调地跟踪输入信号并能给出较好微分信号的二阶离散形式跟踪-微分器:

$$\begin{cases} v_1(t+h) = v_1(t) + hv_2(t), \\ v_2(t+h) = v_2(t) + h \text{fst}(v_1(t) - v(t), v_2(t), r, h). \end{cases} \quad (8)$$

其中, $v(t)$ 为输入信号, h 为积分步长, $\text{fst}(x_1, x_2, r, h)$ 为如下方式定义的非线性函数:

$$d = rh, \quad d_0 = dh, \quad y = v_1 + hv_2,$$

$$a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|};$$

$$a = \begin{cases} v_2 + \frac{y}{h}, & |y| < d_0, \\ v_2 + \frac{\text{sgn}(y)(a_0 - d)}{2}, & |y| \geq d_0, \end{cases}$$

$$\text{fst} = \begin{cases} -r \frac{a}{d}, & |a| \leq d, \\ -r \text{sgn}(a), & |a| > d. \end{cases}$$

目前,实际应用中的TD一般都采用这种结构。

4)对二阶TD的频率特性分析表明,二阶TD的频率特性类似于二阶线性低通滤波器^[26],但具有线性系统无法比拟的优点(见图3~6, A为输入正弦信号 $v(t) = A \sin(\omega t)$ 的幅值, r 为二阶TD(8)中的参数):

i) TD的相频特性有如下特点:在截止频率之前,随着 ω 的增大,相移变化缓慢;但在截止频率附近,相移突然增大,穿过 -90° 而很快接近 -180° (图4,5).对比二阶线性振荡环节 $\frac{1}{s^2 + 2\zeta s + 1}$ 的频率特性(图3),欲使通带内有较小的相移,阻尼比 ζ 必须较小,但这时幅频特性中出现较大的谐振峰,从而引起大的超调,这是经典调节理论中过渡过程的快速性和超调之间存在不可调和的矛盾的原因.而TD频率特性的最大特点是其带通内有较小的相移,而且不产生谐振.正因为如此,TD能保证有较短的过渡过程而不出现超调.图6为不同输入幅值下TD(8)的输出 $v_2(t)$ 的频率特性,可见其具有较好的微分功能。

ii) TD的频率特性图还显示,当 r 固定时,对不同幅值的输入信号,其频率特性形状相似,仅截止频率随输入信号幅值增大而减小,见图5;而当输入信号幅值固定时,对不同的 r ,其频率特性形状也是相似的,仅截止频率随 r 的增加而增大,见图6。

可见,二阶TD具有优越的二阶低通滤波特性.那么是否可以用TD这一新的信号处理“机构”来构造各种高性能的带通滤波器呢?

注 由于TD(8)为非线性环节,其频率特性图是通过输入正弦信号频率 ω 进行逐点计算而作出的一种近似分析,如何更全面地分析非线性环节的频率特性还有待进一步研究。

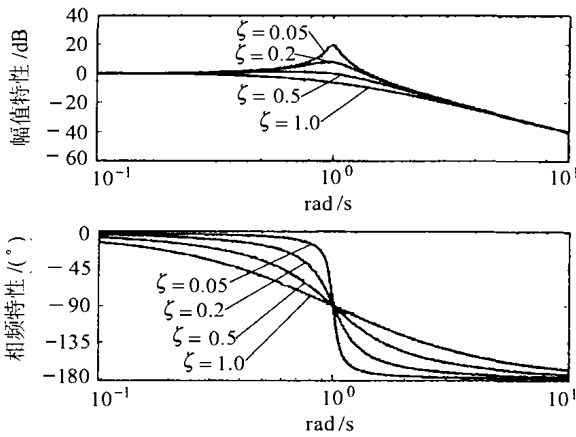


图 3 不同阻尼比的二阶线性振荡环节波特图
Fig. 3 Bode plot of second order linear oscillation

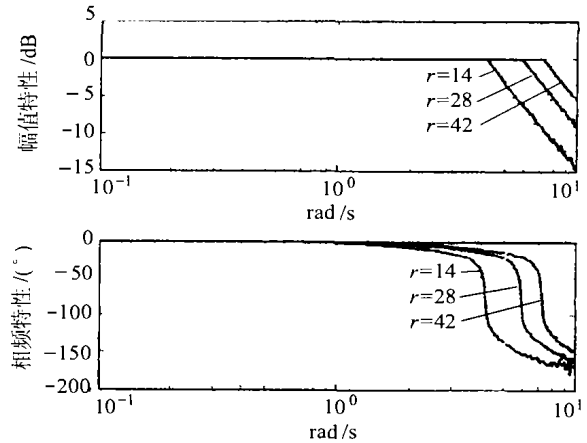


图 4 输出 $v_1(t)$ 的频率响应特性
Fig. 4 Frequency characteristics of the output $v_1(t)$

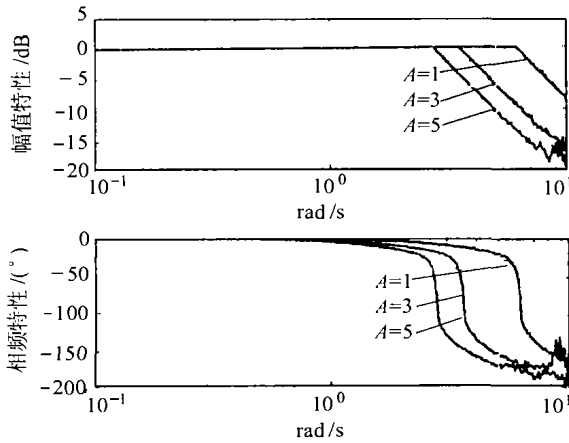


图 5 输出 $v_1(t)$ 的频率响应特性
Fig. 5 Frequency characteristics of the output $v_1(t)$

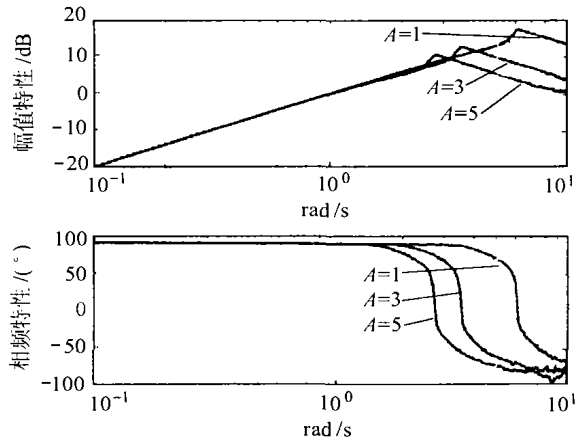


图 6 输出 $v_2(t)$ 的频率响应特性
Fig. 6 Frequency characteristics of the output $v_2(t)$

3.2 扩张状态观测器的发明,自抗扰控制器的诞生 (Extended state observer and active disturbance rejection controller)

“积分反馈是否必要?”这是一个有意思的问题。

从控制系统应注重“控制好过程”的思想看,经典 PID 设计注重于通过消除误差来控制好过程,却并不对过程本身,即系统(6)中的 $a(t)$ 进行任何预测或估计. PID 控制中的积分环节实际上起着补偿式(7)中 $a(t)$ 的作用.但由于 PID 并不对 $a(t)$ 进行估计,所以积分的大小难以做到有的放矢,因而鲁棒性差.可以想象,若能实时估计好 $a(t)$ 并进行补偿,控制器必将具有很强的鲁棒性.扩张状态观测器的发明实现了这一设想。

如果将文[15]构造非线性观测器(4)估计非线性系统(3)中未知参数的思想进一步推广,把式(6)中的不确定信息 $a(t)$ 视为系统的扩张状态,即将系统(6)扩张为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3 + u, \quad x_3(t) = a(t) \triangleq f(x_1(t), x_2(t)), \\ \dot{x}_3 = h(t), \quad h(t) = \dot{a}(t), \\ y = x_1, \end{cases} \quad (9)$$

那么,可以对扩张状态 $x_3(t)$, 即 $a(t)$ 进行实时估计.文[27]将这一思想发展为对形如 $\dot{x}^{(n)} = f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + w(t)$ 的不确定系统建立非线性扩张状态观测器(extended state observer, ESO):

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - g_1(z_1 - x(t)), \\ \vdots \\ \dot{z}_n = z_{n+1} - g_n(z_n - x(t)), \\ \dot{z}_{n+1} = -g_{n+1}(z_n - x(t)). \end{cases} \quad (10)$$

只要适当选取观测器中的非线性函数 $g_i(\cdot)$, $i \in \underline{n+1}$, 以 $x(t)$ 为输入的此系统的各状态将分别跟踪被扩张的状态向量,即

$$\begin{aligned} z_1(t) &\rightarrow x(t), z_2(t) \rightarrow \dot{x}(t), \dots, z_n(t) \rightarrow \\ &x^{n-1}(t), z_{n+1}(t) \rightarrow x^{(n)}(t), \end{aligned} \quad (11)$$

那么特别有意义的是如下一个事实:

$$\begin{aligned} z_{n+1}(t) &\rightarrow x^{(n)}(t) = a(t) \triangleq \\ &f(x(t), \dot{x}(t), \dots, x^{(n-1)}(t)) + w(t), \end{aligned} \quad (12)$$

即尽管函数 $f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)})$ 和外扰 $w(t)$ 未知,但系统运行过程中的实时值 $a(t)$ 仍能被估计出来.显然,当取 $g_i(e) = \beta_0 e$ ($i \in \underline{n+1}$) 时,式(10)具有传统的 Luenberger 观测器

的形式,当取 $g_i(e) = \beta_{0i}(e + k_{ci}\text{sgn}(e))(i \in \underline{n+1})$ 时,式(10)具有变结构观测器形式.而 ESO 一般采用非线性结构(5),可取得更好的效果.

正是这个非线性功能单元的出现,为进一步改进非线性 PID 控制方案提供了可能:既将这个实时作用量 $z_{n+1}(t) (\rightarrow a(t))$ 补偿到控制器中去,于是非线性 PID 中的积分就可以取消了.

基于上述工作,文[28]提出了一种新的控制律—非线性状态误差反馈控制律,由于它能够自动补偿对象模型的内扰和外扰,因此,将其取名为自抗扰控制器^[29](见图7).

综上所述,自抗扰控制器是对“反馈系统中的线性与非线性”,“模型论”与“控制论”等一系列根本问题进行不懈探索的结果.利用“自抗扰控制器”进行系统设计时,可以把系统中的许多不同因素归类为对系统的这种,或那种“扰动”,然后用“扩张状态观测器”进行估计、补偿,使其变为线性系统的标准形:积分器串联型,从而实现动态系统的动态反馈线性化.这是用“自抗扰控制技术”设计控制器时的灵活性,也是把复杂问题进行简化的手段.例如,将自抗扰控制器用于多变量系统的控制,不同通道的相互影响同样可以看作是一种外扰,各通道用 ESO 各自独立地进行在线跟踪及补偿,从而轻松实现解耦控制.再使用非线性配置构成非线性状态误差反馈控制律(N.S.E.F)来提高其闭环系统的控制性能.文[30]以飞行器姿态控制为例说明了如何灵活运用自抗扰控制器设计简单高效的控制系统.

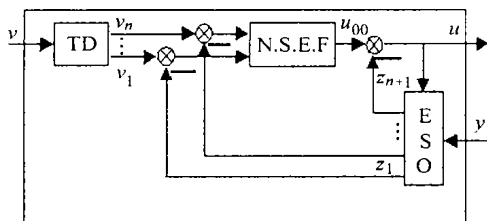


图7 自抗扰控制器结构图

Fig.7 The diagram of ADRC controller

目前,“自抗扰控制器”已在“四液压缸协调控制”^[31]、“炉温控制”^[32]、机器人高速、高精控制^[33-35]、“异步电机变频调速控制”^[36]、“传动装置的运动控制”^[37]、“CNC 高速高精度非圆车床控制”^[38]”等不同装置的实物实验中均取得了很理想的控制效果.其中,应用“自抗扰控制技术”开发的 300N 级和 800N 级直线电机的 CNC 车床已在广州机床厂投入生产.

自抗扰控制器在应用领域的成功运用也推动了一些新理论课题的发展:

1) “扩张状态”的概念非常有意义,逆系统方法、微分几何反馈线性化都是在模型的基础上实现对系统中非线性动态的补偿与解耦,自适应控制、鲁棒控制则是为应对系统建模中的各种不确定性,为解决扰动问题,提出了内模原理、干扰解耦方法等,而 ESO 则可以将系统中含有的非线性动态、模型不确定性及外部扰动等都视为扩张状态而加以观测,其内在的鲁棒性和抗干扰性也就不难理解了,这一思想至今仍

是新颖而独特的.由于 ESO 采用输出误差的非线性连续校正结构而不是配置极点,因而不能用极点配置或代数 Lyapunov 方程等通常用于线性观测器或变结构观测器的分析方法对 ESO 进行理论分析.目前,关于二阶 ESO 的分析已有比较完整的结果^[39,40],如何对三阶 ESO 进行理论分析的工作正在进行之中.

2) 非线性 PID 及自抗扰控制器大大摆脱了对对象模型的依赖,从非线性 PID 及自抗扰控制器的角度,对象不再以线性或非线性,时变或时不变来划分.当然,世界之大,一个参数固定的控制器不可能控制所有的对象,文[41,42]提出了描述对象变化快慢的特征量,“时间尺度”,的概念,指出“时间尺度”是反映系统的本质特征而与整定控制器参数直接相关的量.然而如何严密地定义并计算系统的“时间尺度”这一工作持续至今.

3) 关于“控制器本身的鲁棒性”问题.在自抗扰控制器的完善与推广应用中发现,闭环系统品质有时对自抗扰控制器本身的参数变化具有很强的不敏感性,这实际上是工程应用上的一个很好的品质,为此,文[43]提出了“控制器的鲁棒性与适应性”的概念.即一个好的控制器不但要对不确定对象具有适应性,控制器本身的参数也应具有很强的鲁棒性,前者无论在工程上还是在理论研究中已得到极大的重视,而后者在控制理论研究中则往往被忽视.

4) 自抗扰控制器及其他一些寻求独立于模型的控制方法,如文[44],的工作都发现,实际上(A,B,C)模型中的 B 是设计控制器需要的信息,尽管可以只是对 B 的一个粗略估计量.但如何寻找简单有效的办法确定 B 仍是一个值得进一步研究的问题.

文[18]对以上问题有一较为详细的论述.

4 小结(Conclusions)

本文以自抗扰控制器的发展为线索,阐述了其中所蕴涵的一些主要思想.值得一提的是,这些思想的产生及验证大多来自于大量的计算机仿真这一新技术手段,而非传统的理论推导.所谓“仁者见仁,智者见智”,文中所介绍的一些思想及提出的许多观点还有待进一步商榷,思索及探讨,但笔者认为这些思想对如何解放思想,勇于突破传统观念,大胆探索新方法给予了可贵的启示.

自抗扰控制器可谓是在控制理论与控制工程的激烈矛盾冲突中艰难地成长起来的.控制理论与控制工程似乎是一对具有浓厚血缘关系的冤家,见面就吵却又常常抬头不见低头见.笔者以为控制理论与控制工程实际上是在研究不同的问题,前者研究能不能做(姑且称为问题 A),如能控性,能观性,解耦性,抗干扰性,可镇定性等,而后者关心怎么做(问题 B),即如何实现精良的控制品质.两者考核的标准不同,前者需要得出无懈可击的一般性结论,而后者更提倡一种“抓住老鼠就是好猫”的精神.因此,问题 A 的证明可能成为问题 B 的指导而不能直接作为问题 B 的解,B 的解可以是 A 的提示而不能作为 A 的证明应是很正常的事,实在不是对立而是相得益彰的两个方面.解决问题 A 必然要从实际对象中提取数

学模型并进行严谨的分析,因此,杰出的控制理论专家往往需要深厚的数学基础与素养,而控制工程由于受技术发展,社会需求的推动,往往在理论指导之前就已先摸着石头过河了.自抗扰控制器正是得益于控制理论成果又不拘泥于控制理论框架下对控制工程的贡献,同时又为控制理论提出了许多新课题.

致谢 感谢高志强博士,许可康研究员为本文提出的许多有益的建议!

参考文献(References)

- [1] Han Jingqing. The Structure of linear system and computation of feedback system [A]. The Proceeding of Control Theory and Its Application [C]. Beijing: Academic Press, 1980 (in Chinese)
- [2] Gao Long, Fan Yushun, Chen Ling. New nonlinear excitation controller in power systems [J]. Journal of Tsinghua University, Science and Technology, 1989, 29(1): 38 - 46 (in Chinese)
- [3] Li Hua, Zhang Baoling, Zhou Rongguang. The new nonlinear controller in excitation system of generator [J]. Journal of Tsinghua University, Science and Technology, 1992, 32(1): 1 - 10 (in Chinese)
- [4] Gao Long, Chen Lin, Fan Yushun, et al. A nonlinear control design for power systems [J]. Automatica, 1992, 28(5): 975 - 979
- [5] Ma Youjie, Chen Shousun, Zhang Baoling. The investigation of SVC nonlinear control to improve the stability of power systems [J]. Journal of Tsinghua University, Science and Technology, 1994, 34(4): 1 - 8 (in Chinese)
- [6] Ma Youjie, Zhou Xuesong, Chi Zhenggang. The application of direct feedback linearization theory to the Pingdu's thermoelectric power plant [A]. The Proceeding of Chinese Control Conference [C]. Qingdao, 1996, 1286 - 1290 (in Chinese)
- [7] Luh J Y S, Walker M W, Paul R P C. Resolved-acceleration control of mechanical manipulator [J]. IEEE Trans. Automat. Control, 1980, 25(3): 468 - 474
- [8] Raibert M H, Horn B K P. Manipulator control using the configuration space method [J]. Industrial Robot, 1978, 5(2): 69 - 73
- [9] Isidori A. Nonlinear Control Systems [M]. London: Springer-Verlag, 1995
- [10] Han Jingqing. Linear and nonlinear of feedback system [J]. Control and Decision, 1988, 3(2): 27 - 32 (in Chinese)
- [11] Han Jingqing. State feedback - a method of system identification [J]. Control and Decision, 1990, 5(1): 13 - 17 (in Chinese)
- [12] Han Jingqing. The state observer of a class of nonlinear systems [J]. Control and Decision, 1990, 5(3): 57 - 60 (in Chinese)
- [13] Han Jingqing. The realization of state feedback in a class of nonlinear systems [J]. Control and Decision, 1991, 6(3): 161 - 167 (in Chinese)
- [14] Han Jingqing. Control theory - model theory or cybernetics [J]. System Science and Mathematical Science, 1989, 9(4): 328 - 335 (in Chinese)
- [15] Wang Wei, Han Jingqing. A method of estimation parameters of nonlinear systems [J]. Control and Decision, 1993, 8(3): 161 - 165 (in Chinese)
- [16] Huang Yi, Han Jingqing. Disturbance rejection and tracking design via the SSR approach for second order uncertain systems [J]. Systems Science and Mathematical Sciences, 1999, 12(Suppl): 96 - 103
- [17] Han J Q. Nonlinear design methods for control systems [A]. The Proc. Of the 14th IFAC World Congress [C]. Beijing, 1999, 521 - 526
- [18] Gao Zhiqiang, Huang Yi, Han Jingqing. An alternative paradigm for control system design [A]. Proceedings of IEEE Conference on Control and Decision [C]. Orlando, 2001, 4578 - 4585
- [19] Han Jingqing. The nonsmooth synthesis of control system [A]. The Proceeding of Chinese Control Conference [C]. Hong Kong, 2000, 483 - 488 (in Chinese)
- [20] Han Jingqing. Nonlinear PID controller [J]. Acta Automatic Sinica, 1994, 20(4): 487 - 490 (in Chinese)
- [21] Han Jingqing. A new controller-NLPID [J]. Control and Decision, 1994, 9(6): 401 - 407 (in Chinese)
- [22] Kailath T. Linear Systems [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc., 1980
- [23] Han Jingqing, Wang Wei. Nonlinear tracking differentiator [J]. Systems Science and Mathematical Science, 1994, 14(2): 177 - 183 (in Chinese)
- [24] Han Jingqing, Yuan Luling. The discrete form of the tracking differentiator [J]. The Systems Science and Mathematical Science, 1999, 19(3): 268 - 273 (in Chinese)
- [25] Han Jingqing, Huang Yuancan. The frequency characteristic of the second order tracking differentiator [J]. Mathematics in practice and Theory, to appear (in Chinese)
- [26] Song Jian, Han Jingqing. The analysis and synthesis theory of linear time optimal control system [J]. Mathematical Evolution, 1962, 5(4): 264 - 284 (in Chinese)
- [27] Han Jingqing. The extended state observer of a class of uncertainty objects [J]. Control and Decision, 1995, 10(1): 85 - 88 (in Chinese)
- [28] Han Jingqing. Nonlinear state error feedback control law - NLSEF [J]. Control and Decision, 1995, 10(3): 221 - 225 (in Chinese)
- [29] Han Jingqing. Active disturbances rejection controller and its applications [J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19 - 23 (in Chinese)
- [30] Huang Yi, Xu Kekang, Han Jingqing, et al. Flight control design using extended state observer and non-smooth feedback [A]. Proceedings of IEEE Conference on Control and Decision [C]. Orlando, 2001, 223 - 228
- [31] Xie Weiming. The investigation on synchronous system of hydraulic press and control theory of nonlinear state error feedback [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 1996 (in Chinese)
- [32] Ding Shuchu. Active disturbance rejection controller and its applications in furnace control [D]. Beijing: Institute of Systems Science of Chinese Academy of Science, 1996 (in Chinese)
- [33] Baks M W, Luo Z H, Han J Q, et al. ESO for motion control of high speed high precision robot [J]. Japanese Robotics Society

- Journal, 2000, 18(2):244 - 251 (In Japanese)
- [34] Ishii C, Han J Q, Tamura S, et al. The nonlinear PID control for the robotic arm with two degrees of freedom [R]. Tokyo: Engineering Department of Shangzhi University, 1993 (in Japanese)
- [35] Huang Yi, Luo Z W, Svinin M, et al. Extended state observer technique for control of robot systems [A]. The Proc. of the 4th IEEE World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Shanghai, 2002
- [36] Feng Guang, Huang Lipei, Zhu Dongqi. The investigation of application of ADRC controller to asynchronous machine [J]. The Tsinghua Science and Technology, 1999, 39(3):30 - 33 (in Chinese)
- [37] Zhiqiang Gao, Shaohua Hu, Fangjun Jiang. A novel motion control design approach based on active disturbance rejection [A]. Proceedings of IEEE Conference on Control and Decision [C]. Orlando, 2001, 4877 - 4882
- [38] Zhou Huixing. The study on linear servo unit in manufacturing system and its applications [D]. Beijing: Tsinghua University, 1998
- [39] Huang Yi, Han Jingqing. Analysis and design for nonlinear continuous extended state observer [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(21):1938 - 1944
- [40] Han Jingqing, Zhang Rong. The error analysis of the second order extended states observer [J]. The Systems Science and Mathematical Science, 1999, 10(4):465 - 471(in Chinese)
- [41] Han Jingqing, Wang Xuejun. The time scale of a system and nonlinear PID controller [A]. The Proceeding of Chinese Control Conference [C]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1994, 314 - 321 (in Chinese)
- [42] Zhang Wenge. The time scale and ADRC controller [D]. Beijing: Institute of Systems Science of Chinese Academy of Science, 1999, 314 - 321 (in Chinese)
- [43] Han Jingqing. The robustness of control systems and the Godel's imperfectness theorem [J]. Control Theory and Its Application, 1999, 16 (suppl.):149 - 155 (in Chinese)
- [44] Lam S H. Universal controller for reasonable nonlinear systems [R]. Princeton University, MAE report 2089, 1998

本文作者简介

黄 一 1967 年生. 1989 年毕业于华中理工大学自动控制系. 1992 年中国科学院系统科学研究所获硕士学位. 1995 年东南大学获博士学位. 现为中国科学院系统科学研究所副研究员. 主要研究方向为控制系统综合. Email: yhuang@amss.ac.cn

张文革 1966 年生. 1991 年北京化工大学自动化系获硕士学位. 1999 年中国科学院系统科学研究所获博士学位. 现为中国农业大学副教授. 主要研究方向为非线性控制系统的理论和设计, 计算机控制与仿真.

2003 年 IFAC 冶金自动化新技术国际会议征文通知

上海 浦东 2003 年 10 月 11 - 13 日

IFAC(International Federation of Automatic Control)冶金自动化新技术国际会议(IFAC Workshop on New Technologies for Automation of Metallurgical Industry)将于 2003 年 10 月 11 - 13 日在上海浦东召开. 本次会议将为冶金自动化方面的专家和学者提供一个相互交流的论坛. 会议由 IFAC 采矿、矿物和金属加工自动化技术委员会发起, IFAC 低成本自动化技术委员会和 IFAC 发展中国家技术委员会联合发起. 受中国自动化学会委托、经 IFAC 批准, 会议由大连理工大学和上海宝信软件股份有限公司联合承办.

征文范围:与冶金工业生产过程有关的检测与自动化装置、建模与控制、故障诊断、计划与调度、管理与优化等, 上述有关方法与技术的实际应用, 具有冶金应用背景或实际考虑的相关理论研究论文也在征文范围.

征文要求:论文作者应向会议程序委员会秘书处提交英文论文全文, 且 Email 投稿. 论文应按照 IFAC 论文版式(双列)排版, 不能超过 6 页. 详细请参看 IFAC 官方网站 www.ifac-control.org 关于投稿的要求或直接访问 www.elsevier.com/locate/ifac. 投稿的论文经国际程序委员会审稿, 接受的论文要求至少一位作者注册并参加会议. 按照 IFAC 惯例, 会议向与会代表提供会议论文预印集(Preprints), 参加会议并在会上选读的论文将被收入 IFAC 正式论文集(Proceedings), 论文集由 Elsevier Science Ltd, Oxford, UK, 出版. 优秀论文可推荐到 Control Engineering Practice 等国际期刊, 详细的英文征文通知请见 <http://www.baosight.com/ifac03>.

国际程序委员会秘书处

潘学军副教授, 大连理工大学信息与控制研究中心, 116024

电话: 0411 - 4707576, 传真: 0411 - 4707579, Email: panxj@dlut.edu.cn

组织委员会秘书处

丛力群博士, 上海宝信软件有限责任公司, 201203

电话: 021 - 50803342, 传真: 021 - 50800701, Email: congliqun@baosight.com

重要日期

论文提交日期: 2003 年 2 月 28 日, 录用通知: 2003 年 5 月 31 日

论文终稿(按 IFAC 发表论文版式)提交日期: 2003 年 7 月 31 日