

自抗扰控制技术

—— 估计补偿不确定因素的控制技术

Active Disturbance Rejection Control Technique
— the technique for estimating and compensating the uncertainties

韩京清 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

自抗扰控制技术

——估计补偿不确定因素的
控制技术

Active Disturbance Rejection Control
Technique—the technique for estimating
and compensating the uncertainties

韩京清 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

自抗扰控制技术:估计补偿不确定因素的控制技术/

韩京清著. —北京:国防工业出版社, 2008. 9

ISBN 978-7-118-05795-9

I. 自... II. 韩... III. 自动控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 084716 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 12 字数 300 千字

2008 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 42.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参
(按姓氏笔画排序)

李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 何新贵

韩京清教授

学界良贤挚友
学部骁将先锋

两院院士 宋健

二〇〇八年六月

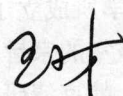
序

今年是韩京清研究员发表论文《自抗扰控制器及其应用》十周年,而自抗扰控制思想的形成则经历了更长时间的探索。1962年,随着现代控制理论在国际间的崛起,在钱学森的倡议下,中科院数学所成立了控制理论研究室,关肇直任室主任,宋健任副主任,该室的宗旨是面向国防并推动现代控制理论在中国的应用与发展,韩京清研究员作为该室的首批成员,在理论与实际的结合上辛勤工作了一生。韩京清研究员因20世纪60年代初配合宋健院士发展完善了线性最速控制系统的分析与综合理论;20世纪70年代末率先开办并主持全国现代控制理论暑期讨论班,在全国推动现代控制理论的应用研究工作;20世纪80年代在国内率先推动控制系统计算机辅助设计软件系统研究并主持完成了国家自然科学基金重大项目“中国控制系统计算机辅助设计软件系统”等一系列工作而蜚声中国控制理论界。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,韩京清研究员从20世纪80年代开始勇于以批判的态度反思现代控制理论的发展现状,对现代控制理论的研究方法提出了一系列触及本质的质疑,并义无反顾地踏上了一条探索开创实用控制方法的荆棘之路。

在对控制系统线性与非线性的关系以及对模型论与控制论等问题的深入探讨中,在深入认识经典调节理论与现代控制理论各自的精华与局限的基础上,韩京清研究员提出了一系列实用控制设计思想并形成了自抗扰控制技术。在提出自抗扰控制这一思想后的10年中,韩京清研究员深入国内外的许多高校、工厂进行讲学和应用研究工作,不断发展完善并推动自抗扰控制技术的应

用。现在,在全国许多高校以及国外的一些学校都有不同院系的硕士生和博士生在各自的研究领域运用自抗扰控制思想进行课题研究,大家更期望韩京清研究员能够撰写一部全面系统地论述自抗扰控制技术方面的专著。现在这部力作出版了,这是人们已久的期待。韩京清研究员的这部专著论述了“自抗扰控制技术”的各个组成部分和各种实用非线性控制器,并且书中有大量的数字仿真实例阐述对一些现象和新问题的探索和思考,相信这本专著不但可以帮助读者更好地理解并运用自抗扰控制技术,更能推动控制科学与实际相结合的应用研究。

中国工程院院士



2008年6月

前 言

控制是以适当的控制力来驾驭被控对象,使其运动在各种扰动作用之下也能按期望的方式(按给定的目标轨迹或设定值)变化.施加控制力的根本途径和目的是“感受控制目标与对象实际行为之间的误差,适当处理这个误差来消除它”,即“基于误差来消除误差”.近一个世纪的控制理论发展的历史就是围绕“消除这个误差”的两种不同方法相互交错而发展的历史.这两种不同方法是:

一是“基于误差来消除误差”的控制策略.以 PID 调节器为代表的实用工业控制器都是基于这种控制策略来做成的.

二是“基于内部机理描述的控制方法”的控制策略,即以对象数学模型为研究的“出发点”,也是研究的“归宿”的现代控制理论方法.

在控制工程实际中,控制目标和对象实际行为之间的误差是容易获取的,也是能够适当加以处理的,因而“基于误差来消除误差”的控制策略的原形——PID 控制器在工业控制实际中得到了广泛的应用.实际控制工程问题,通常很难给出其“内部机理的描述”,因而基于数学模型的现代控制理论给出的控制策略,在实际控制工程中很难得到有效应用.

这是控制工程实践与控制理论之间,延续了半个多世纪而未能得到很好解决的脱节现象.

误差信号的适当处理来决定消除此误差的控制力,即“基于误差来消除误差”的控制策略是经典 PID 给我们留下的宝贵思想遗产.经典 PID 原理可以直观地翻译成“误差的过去(I)、现在

(P)、将来(变化趋势)(D)的加权和”。由于PID技术成形并投入工程应用的时期,受到当时的科技水平限制,处理误差信号的办法太单调、粗糙,使得“基于误差来消除误差”的效率未能得到充分的发挥。但是为什么这样简单的误差反馈律能够解决许多控制工程实际问题而得到广泛的应用?理论家们借助于被控对象数学模型来进行解释、演绎、推广,于是围绕精确模型的所谓“控制理论”产生和发展了,也促成了所谓“现代控制理论”的发展。实际上,对象的精确模型是“现代控制理论”赖以生存发展的出发点(如分析、设计)也是其研究的归宿(辨识、建模)。

尽管现代控制理论给出的设计方法不太实用,这个理论却阐明了控制系统的许多基本特性,提供了很丰富的新的信号处理方法。但是,由于过于追求理论上的完美而经常限制在数学模型和线性思维框架之中,因而没能使信号处理效率得到进一步的提高。

如果基于现代微处理器的数字技术,用特殊的非线性效应(微处理器只认得程序,不会区分线性和非线性)来开发出效率更高的信号处理办法并把这些方法应用于误差信号的处理上,那么就能提高“基于误差来消除误差”的效率,从根本上克服PID技术的局限性而能够开发出质更好、效率更高的新型实用控制器。

基于这种认识,自20世纪80年代末开始,本书的作者相继开发出非线性跟踪微分器、扩张状态观测器等对信号处理及控制具有独特功能和效率的新型非线性动态结构,也提出了具有特殊功能的非线性误差反馈机制,从而开发出非线性PID、最优非线性PID、自抗扰控制器、最优自抗扰控制器、自寻最优自抗扰控制器等一系列新型非线性实用控制器。在这些新型控制结构中,自抗扰控制器最具代表性,因而统称“自抗扰控制技术”。

在实现消除误差来实现控制目标的过程中,很重要的任务是如何施加控制力来抵消各种不确定外扰作用的影响。在达到控制目标的过程中,如何消除各种外扰影响是反馈系统设计必须考虑的重要课题。在控制理论发展历史上曾出现过两种原理:20世纪40年代苏联学者提出的“绝对不变性原理”(欲想克服外扰影响,

就要测量外扰;控制器必须同时含有反馈稳定的通道和抑制外扰的通道,即“双通道原理”)和 20 世纪 70 年代加拿大学者提出的“内模原理”(欲想克服外扰影响,就要知道外扰模型;控制器必须含有这个外扰模型).但是自抗扰控制器的最突出的特征就是把作用于被控对象的所有不确定因素作用都归结为“未知扰动”而用对象的输入输出数据对它进行估计并给予补偿.“自抗扰”的意义就在于此.这里并不需要直接测量外扰作用,也不需要事先知道扰动作用规律(当然能获取更好).这样,自抗扰控制技术,本质上彻底突破了“绝对不变性原理”和“内模原理”的局限性.

自抗扰控制技术是适应数字控制的潮流、吸收现代控制理论成果、发扬并丰富 PID 思想精髓(“基于误差来消除误差”)、开发运用特殊非线性效应来发展的新型实用技术.因此,凡是能用常规 PID 的场合,只要能够数字化,采用自抗扰控制器就会使其控制品质和控制精度有根本的提高.尤其是在恶劣环境中要求实现高速高精度控制的场合,自抗扰控制技术更能显出其优越性.

自抗扰控制技术所需的被控对象信息是对象的阶次,力的作用范围,输入输出通道个数和联结方式,信号延迟时间,特别是代表系统变化快慢的“时间尺度”等很容易得到且物理概念清晰的特征量.至于目前的按线性、非线性,时变、时不变,单变量、多变量等传统的系统分类法在自抗扰控制技术中已不再适用,而“时间尺度”才是区别不同被控对象的新的标准,即“时间尺度”相当的被控对象是可以用同样的自抗扰控制器进行控制的.“时间尺度”是描述被控对象的新的特征量.以这个特征量作为新的抽象被控对象的控制理论尚未展开,但自抗扰控制技术的广泛应用,必定会推进适应自抗扰控制技术的新的控制理论的产生和发展.

自抗扰控制技术是深入认识经典调节理论与现代控制理论各自优缺点,大量运用计算机数字仿真实验来探索和改进而发展出来的.回顾近 20 年的自抗扰控制技术的发展历程,无法想象如果作者沿着传统的理论推理和命题证明的路子会发展出实用的自抗扰控制技术.作者很庆幸 20 世纪 70 年代自学了用 Fortran 算法语言

和应用软件 Matlab 来编程进行数字仿真实验,如果没有应用这些计算机软件来进行的数字仿真实验,不可能有今天的自抗扰控制技术.至此作者更深刻地感受到 1982 年底美国何毓琦教授在一篇编者按语中所提倡的要发展“控制系统的实验研究”的实际意义.按传统观点,靠计算机数字仿真研究所得到的结果是不能直接应用于实际控制工程实践中的.但是大量的数字仿真研究和现场应用实践表明,由于自抗扰控制器完全独立于被控对象的具体数学模型,对被控对象进行大致描述的近似模型再加一些极端形式扰动的模型来代表被控对象,进行计算机数字仿真实验所得的结果,完全可以直接应用于实际对象上.从这种观点看,把计算机作为数字仿真实验平台来进行控制系统的实验研究是完全可以的.另外,计算机仿真技术已发展到很高的水平,以很高的逼真度来模仿许多实际系统行为.实际上,以这种仿真系统作为平台来进行控制系统的实验研究已经在控制工程界得以实现.

自抗扰控制技术已在我国电力系统、精密机械加工车床、化工过程、现代武器系统等领域得到推广应用,取得了显著的社会效益和经济效益.在导弹控制预研项目中的应用显示出传统控制方法无法比拟的效果.聚丙烯反应釜升温段的自动控制是尚未解决的难题,2002 年 8 月在广东茂名聚丙烯厂,用我们开发的自抗扰控制器来进行现场自控实验,取得了令人满意的控制效果.2004 年 9 月在日本成功地实现了微型机械 Micro-Slide 的精度为纳米级的位移控制.2002 年在美国给 NASA 解决了航天太阳发电装置中的稳压控制问题取得很好效果.2004 年在 NASA 开发的喷气发动机仿真系统中运用自抗扰控制技术进行的喷气发动机控制实验,取得了令人振奋的效果.自抗扰控制器在控制工程不同领域中的实物实验和现场应用效果表明,它将以数字控制器的形式,必定能够取代延续了半个多世纪的经典 PID 调节器,而进入更高层次的“自抗扰控制器时代”.

作者于 20 世纪 80 年代后期开始进行自抗扰控制技术研究,其后的十几年研究过程是该技术脱胎换骨的历程.说“脱胎换骨”

是指抛开了熟悉的理论推理和命题证明的研究路线,踏上了用计算机仿真实验来探索实用工业控制器的新路子. 由于脱离了传统的研究路线而得不到专家们的认可,科研经费也难以得到保障. 更为困难的是,学数学出身的我,尽管从事过控制理论 20 多年,但既没有控制工程实践经验,也没有过程控制的基本概念和知识. 对旨在研究实用工业控制器的人来说,这些经验、概念和知识实在是太重要了. 也不能经常出去请教有关专家. 通过计算仿真发现的一些现象,我却不知道工程上该怎么理解,怎么解释,又如何去改进. 而在我们的研究环境没有能够获取经验的实验装置,身边也没有可以请教和讨论这些基本知识的人. 这时我想到清华大学自动化系高龙教授. 我经常给高龙教授打电话请教并进行讨论,他始终很耐心地指教并鼓励我继续研究,一旦有什么新的结果他马上就在清华园内进行宣传推广. 在整个“自抗扰控制技术”的发展过程中高龙教授的贡献是不可忽略的. 在本书稿完成之际,我特别向高龙老师表示深深的谢意. 还要感谢自抗扰控制技术的形成过程中为解决工程实际问题始终进行合作的许可康研究员、黄一博士. 感谢以解决自抗扰控制技术的各种具体问题来完成学位论文的硕士生、博士生及博士后合作者们. 特别感谢美国克利夫兰州立大学的高志强博士,他在美国培养自抗扰控制技术人才,宣传、推广、应用自抗扰控制技术,以及他邀请我去讲学和作实物实验. 感谢日本上智大学的申铁龙博士,在研究自抗扰控制技术的初期邀请我去讲学并安排做机械人控制实验,这些实物实验的成功大大增强了 I 我继续研究下去的决心.

在本书中很多推理和演绎是采用了微分方程的描述,但求解微分方程的数字计算方法却是采用了最简单的欧拉折线法. 在自抗扰控制技术的研究初期,作者也曾采用过尽可能精确的数字解法,但后来发现没有必要采用花费很多机时的精确算法. 这是因为自抗扰控制技术是把系统的所有不确定因素都归结到系统的总扰动而给予估计和补偿. 我们也可以把数字计算产生的误差归结为系统的不确定因素. 因此在自抗扰控制技术的数字仿真实验中完

全可以采用最简单的微分方程数值解法。

在本书中给出的算法描述都是借用程序语言的写法,特别算法中出现的“=”不是“相等”的符号,而是符号“=”右端表达式算出的结果赋给左端变量的赋值符号,请读者务必记住这点,否则好多地方就看不懂了。

本书将从“基于误差来消除误差”的经典 PID 调节器的分析开始,论述整个自抗扰控制技术的各组成部分和各种实用非线性控制器。各章节将用大量数字仿真实例来说明一些现象和探索改进的办法。因此为了更好地掌握本书的内容,读者最好掌握一种算法语言,编出相应程序,边读边算来进行验证、体会,效果会更好。

为了学习掌握好本书的内容,读者最好具备常微分方程、调节理论和线性控制系统理论的最基础的基本知识(这些理论的细节就不需深究)。

在一些章节中有些较复杂的推导和证明过程,初学者可以先不去理会,不会影响读者学习掌握本书内容的。

本书可以作为学习控制技术应用相关专业的大学本科生、研究生、教师,以及从事控制工程技术的技术员、工程师的教材、参考书和技术参考书。

本书将由以下六章组成:

第一章 剖析经典 PID 调节器。介绍 PID 的基本原理、适应范围及其合理性,指出其不足之处、事先安排过渡过程的益处和安排过渡过程的办法,最后讨论线性对象的“时间常数”概念与反馈增益之间关系并引入“时间尺度”概念。

第二章 跟踪微分器。解剖经典微分器的噪声放大效应的原因,提出了跟踪和微分效率更高的非线性跟踪微分器及其一般形式,进一步给出了实用于数字计算的离散形式,讨论非线性跟踪微分器的频率特性与跟踪微分器在各种不同领域中的应用。

第三章 非光滑反馈的功能和效率。在降低控制目标与系统实际行为之间误差的过程中,线性反馈和非线性反馈的效率有很大差异,指出在非线性特别在非光滑领域有很多比起线性反馈效

率更高的反馈形式,因此“开发利用特殊的非线性效应”是很有意义的研究课题,介绍了“时间最优反馈综合函数”用于误差反馈上的效应。

第四章 扩张状态观测器. 运用现代控制理论中的状态观测器思想,提出了根据对象的输入-输出数据估计对象状态信息和作用于对象的“扰动总和的实时作用量”的扩张状态观测器,讨论“采样步长”与“扩张状态观测器”参数之间关系,以及“采样步长”与系统“时间尺度”之间的关系和用“采样步长”确定扩张状态观测器参数的具体办法。

第五章 自抗扰控制器. 介绍用安排过渡过程、跟踪微分器、扩张状态观测器的各种不同组合来形成的各种不同形式非线性控制器的办法;介绍自抗扰控制器的结构和仿真研究结果。

第六章 自抗扰控制器的应用. 介绍自抗扰控制器在不同类型被控对象问题上应用的具体办法,其中包括解耦控制、零点结构配置、时滞系统控制、串级系统控制、并联系统控制、自适应最优控制等。

本书的写作过程也是进一步探讨一些新问题的过程,因此某些问题的阐述方法比较零乱. 特别是“时间尺度”概念的描述和运用是尚未很好解决的问题,因此只能在不同问题的论述中,通过具体例子形象性地给予说明,加深理解。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

韩京清

2007. 12

目 录

第一章 剖析经典 PID 调节器	1
1.1 误差反馈控制律与经典 PID 调节器	2
1.2 经典 PID 能控制的对象范围	14
1.3 经典 PID 调节器的优缺点	17
1.4 安排过渡过程的作用	19
1.5 时间尺度	32
第二章 跟踪微分器	46
2.1 小时间常数惯性环节	46
2.2 经典微分器	49
2.3 跟踪微分器的一般形式	56
2.4 快速跟踪微分器的离散形式	66
2.5 最速跟踪微分器的频率特性(带通滤波器)	73
2.5.1 TD 的频率特性	73
2.5.2 带通滤波器	75
2.6 跟踪微分器的其他应用	77
2.6.1 安排过渡过程	77
2.6.2 配置系统零点	80
2.6.3 求函数极值	83
2.6.4 求函数的根	85
2.6.5 频率估计	87
2.6.6 相近频率的分离	88
2.6.7 数字整流	89
2.6.8 数字检波	90