

自抗扰控制思想探究

高志强[†]

(克里夫兰州立大学 电机与计算机工程系, 俄亥俄州 克里夫兰市 44115, 美国)

摘要: 韩京清先生1989年的《控制理论: 模型论还是控制论》一文, 反映了他对控制科学与工程实践的深刻理解和整体把握, 为日后自抗扰控制技术(active disturbance rejection control, ADRC)的创建和发展奠定了基础. 可以说它既是源头活水, 又是深入理解自抗扰控制的必经之路. 本文对控制论的范式、本质问题和基本原理进行了进一步的梳理和反思, 探讨了自抗扰控制思想的内涵和意义, 目的是为自抗扰控制技术和理论的进一步发展做好铺垫.

关键词: 控制论; 反馈; 扰动; 抗扰; 范式变换; 指南车原理; 瓦特原理; 负反馈原理; 自抗扰控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A

On the foundation of active disturbance rejection control

GAO Zhi-qiang[†]

(Department of Electrical and Computer Engineering, Cleveland State University, Cleveland, Ohio 44115, USA)

Abstract: Prof. Han Jingqing's milestone paper of 1989: 'Control theory: the doctrine of model or the doctrine of control' showed his deep understanding and complete grasp of the science and engineering of control and it laid the foundation for active disturbance rejection control (ADRC). It is both the origin and the gateway through which ADRC is to be truly understood. To take his critical reflection further, this paper strives to clarify and reflect on the paradigm and foundation of the "the doctrine of control", and to continue to explore the essence and significance of ADRC, for the purpose of facilitating further development of ADRC, in theory and in technology.

Key words: doctrine of control; feedback; disturbance; disturbance rejection; paradigm shift; south-pointing chariot; principle of Watt; principle of negative feedback; active disturbance rejection control

1 引言(Introduction)

自抗扰控制(active disturbance rejection control, ADRC)^[1-5], 以韩京清先生1989年对控制理论的反思为开端^[1], 以他1979年提出的反馈系统的标准型(积分器串联型)为基础^[2], 以工程控制的鲁棒性为目标^[3-5], 经过十几年来工程化, 特别是线性化和参数化^[6], 已在技术上不断成熟, 在应用范围上不断扩大. 在本期《控制理论与应用》纪念韩京清先生逝世五周年专刊内, 读者可以看到关于自抗扰控制在许多领域应用的综述和范例, 包括精密车床中快速刀具伺服控制、微机电传感器、时滞系统、航天器姿态控制、电力系统中锅炉燃烧和负载频率控制等等, 均显示了自抗扰控制技术的巨大潜力.

在国外, 自抗扰控制技术在风险投资的商业运作下, 进行了从学术界到工业界的过渡^[7-11]: 2009年通过了运动控制的工业评估^[7]; 2010年首次在10条尼龙管挤压生产线取代PID, 获得成功^[8-9]; 2011年与德州仪器公司签约^[10]. 2013年4月, 德州仪器开始在全球发布以自抗扰技术为核心的运动控制芯片^[11].

与此同时, 自抗扰控制技术的成熟和发展仍需要理论研究的支持. 其中, 线性化和带宽概念的引入^[6]给理论研究提供了全新的视角, 同时降低了难度. 利用工程师熟悉的频率响应法, 我们发现自抗扰控制有着令人难以置信的鲁棒性^[12]; 而时域分析则验证了在实验中发现的带宽与误差的反比关系^[13]. 这些理论分析的前期工作虽然略显粗糙, 却吸引了理论工作者的关注. 在他们的共同努力下, 自抗扰控制的理论研究开始为工程实际提供更强有力的支持^[14-24], 同时也引起了国内外控制界同仁的关注. 近年来在美国控制会议和中国控制会议以及天津大学等地先后举办了自抗扰控制学术研讨会. 在2012年的南美控制会议上, 还出现了关于自抗扰控制的大会报告^[25]. 作者也先后在美国、意大利和国内的单位举办自抗扰控制讲座和短期课程, 甚至采用QQ群授课的方式继续宣传自抗扰控制¹. 数篇综述文章^[26-28]和最近出版的自抗扰控制文集^[29]更是给初学者们提供了丰富的资源. 但是目前的一个迫切的任务是发掘、整理和提炼韩京清先生留下的宝贵学术遗产, 特别是自抗扰控制所代表的先

收稿日期: 2013-10-18; 收修稿日期: 2013-11-21.

[†]通信作者. E-mail: z.gao@ieee.org; Tel.: +1 216-6873528.

¹群号: 128464029

进控制理念。

自抗扰控制的持续发展取决于能否摆脱生搬硬套, 能否抓住控制的本质, 不断创新。为此, 需要对它的背景有一个整体把握, 特别是韩京清先生1989年提出的“控制论”。他认为控制理论有两个迥然不同的思考方式: 模型论和控制论。前者“靠系统的数学模型去找控制律的方法”; 后者依靠的则是系统的“某些响应特征或过程的某些实时信息”。以运动控制为例, “模型论”需要先通过建模, 建立系统“固有加速度” a 与状态的非线性关系; “控制论”则只要求通过系统的输入输出信号“对 a 做出适当估计”, “但不一定要知道 a 与状态变量之间非线性函数关系本身”。这不就是自抗扰控制中的关键概念——“扩张状态”的雏形吗!

就这样, 韩京清先生以敏锐的眼光为控制理论的发展翻开了新的一页。尽管他后来没有对“控制论”做更多的讨论, 但在对解决自抗扰控制的技术问题上作出了巨大贡献。而今天, 在近四分之一世纪以后, 为了更加深刻地理解自抗扰控制思想, 本文重新回到它的起点: “控制论”, 为的是重现韩先生“君子务本, 本立而道生”的精神境界, 梳理控制论的基本原理、基本问题和范式, 挖掘自抗扰控制思想的深刻内涵。尽管有些观点还不够成熟, 但是对这一思想的探讨, 意义重大而且刻不容缓。本文第2节梳理了控制论的基本原理; 第3节讨论了控制系统的基本特性和控制论的基本问题; 第4节介绍了控制科学的3个范式; 第5节为自抗扰控制的思想溯源; 第6节提出了对控制论进一步发展的展望。

2 控制论的基本原理(The doctrine of control: basic principles)

工程技术的本质是实验科学。它的各个分支往往起源于伟大的发明。而梳理、提炼发明背后的原理却常常需要很长时间。控制科学也不例外。纵观自动控制发展的历史可以看到3个伟大发明: 为人熟悉的负反馈放大器和瓦特的飞锤调节器以及常常被遗忘的中国古代的指南车。不管怎样, 这些发明不光是技术的成功, 更重要的是它们所代表的基本原理。下面将对这三大发明分别介绍, 首先从人们熟悉的负反馈原理开始。

2.1 负反馈原理(The principle of negative feedback)

H. Black为解决放大器中真空管的非线性及其带来的信号失真, 经过几年的摸索终于在1927年发现, 如果把放大器的输出信号乘上一个很小的系数 h , 然后从输入信号中减去, 可以使放大器的失真下降50分贝^[30]。这就是著名的负反馈放大器, 是20世纪的重大发明之一。

为什么这么简单的方法却这样漂亮地解决了一个如此复杂的问题呢? 具体地说, 假设 A 为放大器的放

大系数, 含非线性和不确定性; h 为反馈系数。那么当回路增益满足

$$hA \gg 1 \quad (1)$$

条件时, 该放大器的动态特性可近似为

$$\frac{A}{1+hA} \approx \frac{1}{h}, \quad (2)$$

即在满足式(1)的条件下, 闭环反馈放大器的特性与 A 几乎无关。因此, A 中未知的非线性不再影响放大器的特性及其输出信号的品质。因为一般的放大器开环增益都很高, 即使在 h 很小时, 式(1)和(2)仍然成立。这样, 放大器的放大倍数依然可以很高, 而其中的不确定性在很大范围内都被负反馈抑制住了, 效能极佳。

Black的贡献是把器件(放大器线性化)问题转换为系统问题, 提出了负反馈概念, 发现了负反馈原理, 即一个高增益的开环系统可以通过微小的负反馈得以线性化! 值得注意的是, 作为贝尔实验室的通信工程师, Black关心的并不是控制问题, 起码不是典型的控制问题。

反馈的“反”是相对于“正”而言, 涉及的是信号的走向, 表示反其道而行之。那么“正”道是什么? 正道可以视为系统原有的输入输出之间的因果关系。输入是因, 输出是果。而反馈使这一因果关系具有循环性。当反馈的概念被借用到控制系统时, 沿用的是它原始的输出反馈的含义, 即被控量反馈, 在这里称其为狭义的反馈。相反, 如果把控制器能得到的所有对象的信息(包括扰动)都视为反馈, 就得到了广义的反馈。区别这两个概念的意义, 将在下面的抗扰原理中做进一步的澄清。

2.2 瓦特原理(The principle of Watt)

著名学者R. Brockett精辟地概括道: “如果没有不确定性就没有反馈的必要”^[31]。换句话说, 反馈的主要功能是抑制不确定性。事实上, 对不确定性小的被控对象, 比如步进电机等, 给定了输入, 不用测量就可以相当精确地知道其输出。对于这样的系统, 通常开环控制就足够了。而闭环控制则是18世纪瓦特为了控制蒸汽机转速而发明的。瓦特发明的成功说明了一个自动控制的基本原理, 即瓦特原理: 为了使被控量跟踪给定值, 控制量要与给定值和被控量的差(即跟踪误差)成正比。基于瓦特原理设计的控制器能够应付各种扰动对系统的影响, 既不用给系统建模, 也不用关心到底扰动从何而来。两百多年来, 虽然控制理论的发展日新月异, 但是控制的实践依然是牢牢的遵循瓦特原理, 只不过在误差的比例项之外适当地加入误差的积分和微分项, 即比例积分微分控制器(PID)^[32]。PID是瓦特原理的进一步发展, 它合理地建立了控制量与误差的动态关系。

现以最简单的一阶系统 $\dot{y} = u$ 为例说明瓦特原理。

设 u 为对象的输入,即蒸汽阀门, y 为输出,即蒸汽机转速.控制系统的设计以 y 跟踪参考输入 r 为目的,跟踪误差为 $e = r - y$.蒸汽机转速控制是怎么实现的呢?瓦特借用飞锤控制器使蒸汽机转速的变化率(\dot{y})与转速差(e)成正比: $\dot{y} = k_p e$,其中控制律为 $u = k_p e$, k_p 为控制器参数.这样,当系统进入稳态时,误差为零.瓦特原理给我们的启示是:你要控制什么,就让它与跟踪误差成正比!这就是瓦特带来的引发工业革命的一大发明.当然,瓦特蒸汽机本身还有很多缺陷,系统动态也远远比上述的理想系统复杂,因此系统仍存在诸如稳态误差和振动等问题.

蒸汽机在工业革命中起到的巨大作用引起了包括C. Maxwell和J. V. Poncelet等著名科学家对它的关注^[33-37].但是详细的数学分析不能代替对基本原理的把握.瓦特原理貌似简单却意义深刻,中心思想是纠错,是“基于误差而消除误差”的控制率.对于瓦特原理,过去并非没有疑问:为什么一个为了实现误差为零的控制器在误差为零时是不工作的^[38]?这样的困惑同时也是启示:误差出现后当然要纠正,但是在它出现前,能不能找到它产生的根源而消除之?中国古代的指南车展示的就是这样一个截然不同的原理.

2.3 指南车原理(抗扰原理)(The principle of south-pointing chariot, i.e. the principle of disturbance rejection)

指南车是我国古代的伟大发明,被李约瑟称为世界上第一个自动控制系统^[39].它采用了巧妙的齿轮传动,根据左右轮速的差,得到车向变化的信息,并通过相应的补偿,使战车上的木头仙人能够“手常南指”.可是让人费解的是,这么高明的控制系统,通过巧妙的传感器和执行装置,实施准确的控制,过去却一直被人们认为是开环控制.原因是出于对反馈的狭义理解.指南车的齿轮系统分两部分:一是传感器;二是执行机构.大家注意,这里传感器测量的不是被控量(仙人指向,不可测),而是影响被控量的扰动(车向的变化,可测).抗扰是通过执行机构,根据车向的变化,使仙人反转,从而保持“手常南指”.因此,指南车原理也可称为抗扰原理,本意是根据造成被控量偏移的扰动,而不是被控量本身,构造控制量,抵消扰动的影响,使被控量不偏移.不言而喻,指南车所代表的是广义的反馈,有重大意义.

自动控制是应用学科,研究的是如何与客观世界打交道.它之所以存在是源于我们对客观世界的认知有限.由于客观世界的不确定性,我们设计、制造的系统不可能总是输出我们所预期的,这时我们就应当通过适当的控制机制对该系统的控制量进行调整,以得到我们想要的被控量.因此,就像Brockett先生说的,控制系统的主要功能是抑制客观世界的不确定性.特

别是在今天的数字控制的环境下,系统各个部分的不确定性,包括相位和时间滞后、增益的变化等等,都会影响控制的品质,甚至会引起系统的不稳定,造成事故.这时基于瓦特原理的PID控制器就很难满足设计要求,就需要有更好抗扰性能的控制器的.

在工程中不管是天然的还是人造的系统,它本身和它的操作环境一般都具有大量的不确定性.所谓扰动(disturbance)是指那些造成系统被控量偏移的不确定性.抗扰就是要抵消这样的扰动,使被控量不偏移.

两百多年来,控制理论的发展常常是围绕着优化和稳定性问题进行的.但是也有一些学者牢牢地抓住抗扰问题不放,提出了各种抗扰方法,比如等时控制器(isochronous governor)^[34]、不变性原理(invariance principle)^[35]、内模原理(internal model principle)^[40]、未知输入观测器(unknown input observe, UIO)^[41]、内模控制(internal model control, IMC)^[42]、扰动观测器(disturbance observer, DOB)^[43]、双自由度控制器(two degrees of freedom controller, 2DOF)^[44]等等.可以说是丰富多彩.但是由于它们迟迟没能进入控制界的主流意识,至今还没有一个持久的、全面的研究;而且由于缺少交流,文献中有不少重复性的工作.更重要的是,过去的工作局限于狭义的扰动概念,即扰动来源于系统的外部,也称为外扰,与系统的动态特性无关.

对应于狭义扰动,韩京清先生提出了一个广义的扰动概念:即总扰动.它包括上面说的外扰和内扰.内扰是一个全新的概念.可以定义内扰为影响被控量并与系统状态有关的不确定性.内扰概念的提出是思维上的一次飞跃,统一了先前两个不相关的领域:抗扰和鲁棒控制.所谓抗扰一般是指降低扰动对被控量的影响;而鲁棒控制则是要降低系统的未知动态对控制品质和稳定性的影响.在众多文献里,二者的问题和方法截然不同.韩京清先生的独到之处是通过建立内扰和总扰动的概念,改变了看待和处理控制问题的角度和方法,把控制问题的核心归结为抗扰问题;把衡量一个控制器的好坏归结为抗扰的难易、范围的宽窄、功能的高低,等等.以此标准来衡量,各种控制器设计的思路和方法的优缺点就一览无遗了.因此可以说自抗扰控制原理就是广义的抗扰原理.

2.4 前馈控制原理(The principle of feedforward control)

前馈控制^[45]在工业界用途广泛,但是学术界对它很少关心,认为是开环控制,没有什么理论可言.前馈的使用方式主要有两种:一种是根据参考输入和对象模型的逆而得到的控制量,不依赖对象的实时信息,暂且称之为A类前馈;另外一种前馈,是根据被控量之外的对象信息所产生的控制量,即B类前馈.

前馈控制提出的本意是要区别于上面提到的狭义的反馈控制,表示控制量的一部分甚至全部都可以完全独立于被控量的量测。Black定义的反馈(feedback)本来就是针对前馈(feedforward)而言的,表示信号流向反转,由输出到输入。这里信号的走向一正一反,概念很清楚。

可是当反馈这个通讯工程的概念被借用到控制工程时,它的反义词前馈的含义便有了两种解释。比如上面说的A类前馈明显是开环控制,控制量完全独立于对象的实时信息。可是B类前馈则不然,它依赖的还是对象信息,实际上是前面提到的广义反馈,只不过反馈的不是输出量而已。B类前馈在文献中也被称为扰动前馈,它是基于对象扰动信息的实时提取,就像指南车。可是同样是基于对象信息的提取,指南车为什么会被称为开环控制呢?其实B类前馈属于广义反馈,不应称其为前馈或开环控制。鉴于前馈的概念和用法前后重叠,为了概念的清晰,建议今后可把B类前馈归入抗扰原理讨论;把前馈狭义地定义为A类前馈,那么这样的前馈有什么意义呢?为什么它的用途这么广呢?主要原因是它降低了快速跟踪的成本。

一个控制系统要使输出迅速跟踪给定值有两个途径:1)高带宽;2)前馈。但是在工业上,带宽就是成本。高带宽虽然能使跟踪速度提高,但也带来很多问题:1)对执行机构的品质要求提高;2)激励了对象的高频动态使控制问题复杂化;3)闭环系统的稳定裕度下降,对相位滞后和时间延迟更敏感;4)对传感器噪声更敏感,等等。高带宽的成本在20世纪50年代就有专门、详细的讨论,比如文献[46],但是至今没能在理论界引起重视,乃至高增益控制器、观测器的文章比比皆是,而能用上的却寥寥无几。这反映了不考虑成本的研究,在工程上是没有多少意义的。

工程师们在实践中基于对系统物理特性的知识发现了前馈这个办法。这种独立于反馈回路拟合出的控制量通常是结合参考输入,以数据或图表形式表示的,常常在控制信号中占主要部分。同时也使用PID反馈控制器,发挥微调、纠错的作用。因此,工业上的PID控制器常常是与前馈控制结合使用的。

以上总结的是控制论的基本原理,是从事自动控制的人们在长期的工程实践中发现、挖掘出来的,是控制论继续发展的基石。要系统地、科学地建立和发展一套完整的理论体系,就需要对基本原理进行提炼、抽象和升华,使得工程控制的实践能够更加系统,并不断进入更高的层次,从而“下学而上达”。

3 控制论的本质问题(The doctrine of control: the fundamental problems)

两百年来,工业控制技术在现代工业中的各个领域迅速发展,从传感器到执行机构,从模拟电路到各

种形式的数字控制设备,从硬件到软件,发明创造层出不穷,核心技术不断更新换代。但是占主导地位的控制思想却始终离不开瓦特原理,以其为基础的PID控制器在工业控制界始终占据着统治地位。为什么呢?这似乎是个令人难以置信的事情,特别是在现代控制理论蓬勃发展了半个多世纪以后,是任何学习、从事、研究自动控制的人都必须面对的问题。它使我们不得不重新思考控制系统的基本特性和控制学科的基本问题。下面分几个方面探讨。

3.1 稳定性: 反馈系统的本质问题(Stability: the fundamental problem of feedback system)

瓦特原理和负反馈原理都是工程上的伟大发明,带来了巨大的收益同时也带来了严峻的考验。不管是蒸汽机还是负反馈放大器,人们发现一个开环稳定的系统闭环后很容易变得不稳定。因此,以Maxwell1868年的第一篇论文开始^[36],反馈控制问题基本上作为稳定性问题,通过微分方程解的性质研究的。由于此类方法复杂,不直观,对工程实践影响不大^[47]。Nyquist通过对负反馈放大器的研究,创立了实用的稳定性判据和频域响应法,给从事负反馈放大器设计的工程师们提供了有力的工具^[48]。二战后,这一方法被广泛用于伺服控制系统,并成为古典控制论的基石。

但是后人常常忽略的是,虽然反馈控制和反馈滤波系统都有稳定性问题,但是控制与滤波问题有本质的不同。Bode本人1960提出控制与通讯(即信号的传输)的学术性质(intellectual texture)截然不同,它们早该分家了^[49]。MIT的几个老师早在1957年就意识到这个问题,并清楚地阐述了控制系统与滤波系统的根本不同^[46]:

- 1) 被控对象不像滤波器,不可轻易改变;
- 2) 被控对象中存在各种不同的扰动;
- 3) 被控对象中的各种机械环节包括液压、气压动力系统的不确定性远远大于滤波器的参数变化;
- 4) 控制系统的设计要求与滤波远远不同,特别是不允许输出的滞后。

可以说稳定性问题在控制系统中有至关重要的地位。但是并不应该因此把控制与通讯混为一谈,从而忽视了控制系统的本质问题。

Black发现,采用了负反馈,一个高增益放大器在牺牲了些增益后,品质大大提高。问题是保证它的稳定性不容易。因此,负反馈放大器的主要问题是在高增益前提下的稳定性问题。经典控制理论解决的是反馈系统的稳定性问题,因此更应该称其为经典反馈理论。

可是控制问题与此不同:第一,不能依赖高增益;第二,仅仅让控制系统稳定是远远不够的。那么它的关键何在?如果不能抓住自动控制的本质问题,那么

理论与现实的脱节是不可避免的。

3.2 抗扰性：控制系统的本质问题(Disturbance rejection: the fundamental problem of control system)

控制系统设计的基本要求是让被控对象的输出,即被控量,快速地、精确地跟踪一个给定的参考输入信号.因此,控制问题也可以被看成是“求逆问题”:根据对象输出应该是什么,反求它的输入,即控制量.瓦特原理就是个例子:蒸汽机的进气量是通过它的输出量得到的.另外,工程师们还发现控制量还可以不通过反馈,直接根据参考信号和对象的模型,以图表或数学公式的形式得到.这就是前面所说的在工业界广泛应用的“前馈控制”。

实践证明,如果被控对象和它的操作环境是不变的,那么不管用什么方法,不管是试凑还是建模,都可以找到一个满足要求的控制率.难的是当系统和环境发生大范围变化时,如何使被控量继续精确地跟踪参考输入.所谓变化就是上面提到的扰动,包括狭义的和广义的.控制系统的核心问题是在万变中求不变,它的核心就是如何抗扰!

现有的控制系统的基本功能大都是当系统的被控量由于扰动的影响出现偏差时,对其自动地进行校正,即典型的狭义反馈控制;理想控制系统能够在扰动出现时就采取相应的补偿,不管被控量是否已经出现偏差,如以指南车为代表的广义反馈控制.无论如何,抗扰都是自动控制的核心。

韩京清先生关于控制论与模型论的区分体现了对控制问题完全不同的理解:前者的研究对象是系统内外大范围的不确定性,与后者的前提和假设有本质上的不同.而像“状态”、“扰动”、“标准型”等现代控制理论的最基本的概念都需要重新梳理、扩展.自抗扰控制中的核心概念——扩张状态,就是其中一例.另外,扰动的概念和标准型的概念在他研究的推动下都有新的发展。

3.3 最优性：控制科学的价值观(Optimality: the value judgment in control science)

20世纪50年代,经典控制论开始逐渐向现代控制理论展开过渡^[37],核心问题是如何实现控制系统设计的系统化和最优化^[46].几十年来,从最初的时间最优控制到现在的 H_∞ ,实现最优是控制理论发展的理想.但是什么是最优?怎样衡量最优性?在这个问题上应该听谁的?控制理论研究的价值取向应该基于什么?怎样分清良莠?这些问题都是控制论需要研究的重要问题,是理论联系实际的关键.黄琳院士谈到理论与实际的沟隙时说^[50],“原因之一是人们并未将控制工程中提炼出的本质问题的相对具体的信息与知识,附加到一般数学形式上去进行研究.”那么谁来提炼“控制工程的本质问题”?对此宋健院士提出的

要求是“至少应该熟悉一个具体领域中的工程实际问题,这样才能对这一学科的基本命题、方法和结论有深刻的理解”.他还说“没有工程技术的实际知识和实践经验,就缺少完全理解和彻底掌握工程控制论的基础”^[51].几十年来,现代控制理论飞速发展,但始终面临着如何与“工程技术的实际知识和实践经验”相结合的挑战.没有这样的知识和经验为后盾,“完全理解和彻底掌握工程控制论的基础”又从何谈起?没有这样的基础,又怎么抓住“本质问题”?这些问题不少学者很早就看到了。

美国著名导弹控制专家,前美国控制协会主席J. C. Lozier曾经质疑^[52],为什么在进行关于理论与实际沟隙的专题讨论时总是以理论超前于实际为前提,而最终把问题归结于控制系统设计者的再教育.他说一些60年代的设计人员认为解决应用问题的答案是让所有理论工作者实习3年.在同一时期的美国著名过程控制专家G. Shinskey尖锐地指出,离开被控对象特性的控制策略是毫无意义的;不懂被控对象而设计控制系统的人是在欺骗自己^[45].理论研究以数学为基础,通过对基本原理和实际问题的抽象、提炼,建立严密的知识体系,为进一步的技术发展提供基础.这样的知和行本来就是合一的,不应该有沟隙.所谓沟隙,源于理论研究的偏差.具体地说,是源于理论研究者对控制问题认知的偏差和对于现代控制论价值观的盲目认同.这些问题在下面关于范式的讨论还要继续.这里笔者关心的是如何在控制论中,根据工程实践的需要,重新考虑最优性。

首先,对于一个有大量动态不确定性的系统,最优控制有两个问题:1)如何定义最优性;2)怎样设计最优控制器.现代控制理论常用的二次型最优指标来源于卡尔曼滤波,其在信号处理和滤波领域应用广泛.但是远在20世纪50年代美国空军的研究人员就发现,二次型最优指标不适合评价控制系统的品质;相比之下,ITAE是一个较好的指标^[53].但是,这就牵扯到了最优控制的第二个问题:怎样设计最优控制器.应该按照ITAE的,还是二次型的指标设计控制器?按理说,当然是ITAE.但是人们发现这样做数学上相当复杂,而按照二次型寻优,结果既漂亮又相对简单.这个矛盾人们50年代就意识到了,作为现代控制理论基础的解析设计方法有个弱点:工程上有用的品质指标都没有解析解^[46].

用解析设计方法寻优还有另外一个更大的弱点:需要描述系统全局动态的详细的数学模型.而这个前提忽略了对对象的不确定性,并没有反映客观实际。

3.4 开创性：控制科学的前途问题(Innovation: the future of control science)

在历史上,中国人在自动控制领域富于开创性.指南车的发明就是很有说服力的一例,在世界上遥遥领

先^[39]. 它所代表的先进控制思想, 即主动抗扰的思想, 对中国学者可以说是古老的呼唤. 可是它的开创性直到现代才被少数的学者意识到. 战车的运动千变万化, 指南车是怎样“圆转不穷而司方如一”?

以应用数学的思维方式研究控制, 必然走到建模-优化的路子上去. 它给我们带来了现代控制论的丰富的理论成果, 但是它丝毫没有撼动瓦特原理在工程技术方面的主导地位. 原因也许是真正的控制问题不是建模-优化问题; 真正的控制问题是如何处理模型外的大量不确定性. 它的解决当然不能建立在模型(动态)精确或者近似精确的前提下. 这就是韩京清先生1989年讲的大道理: 控制论不能作为模型论来搞; 卡尔曼滤波中的(A, B, C)矩阵不代表真正的被控对象. 工程控制中的被控对象大都是非线性、时变而且未知的.

韩京清先生的自抗扰控制是开创性思维的范例: 它突破了模型论的教条, 以简单的积分器串联型为对象设计控制器, 把实际对象和标准型的差看为广义的扰动, 通过估计而相消, 极具创造性地解决了系统的不确定性问题, 代表了中国人特有的控制思想和实用的控制技术. 自抗扰技术在解决实际问题中的成功应用, 对它的理论分析, 以及近年来国内外对它的关注都说明了一个道理: 研究控制的中国学者并不一定要跟着国际控制界的潮流跑. 值得我们借鉴的是西方科学的质疑精神, 但我们完全可以, 也必须能够独立自主地走自己的路.

两百年来, 瓦特原理就不断受到质疑. 从19世纪初的法国学者庞加莱^[34]到20世纪初的美国学者Trinks^[38], 不少学者看到了它的实质与不足. 他们的疑问²是: 按照这个原理, 控制器只有在被控量变化时才工作, 可是控制器存在的目的不是让被控量不变吗? 自抗扰控制彻底地解决了这个困惑, 也同时给控制科学的进一步发展提供借鉴. 因为所谓开创就是新的观念不断地挑战旧的模式, 就是旧的范式最终被新的范式取代.

4 控制科学的范式(The paradigms of control science)

所谓科学的范式是指支撑着一门学科理论和方法论的世界观³. 每一个学科的发展都是沿着某一特定的范式进行的. 而范式决定于前提, 因为一个范式内所研究的问题、目标和方法都是在一定的前提下提出的. 科学的发展常常是在一定的范式之下长时期积累的过程. 但是不管积累得多么丰富、多么五彩缤纷, 人

们最终总会不可避免地的前提和范式提出疑问, 就像爱因斯坦对牛顿的绝对时间概念这个古典力学的前提提出质疑一样. 这样, 当旧的前提被取代时, 就发生了范式的变更⁴和随之而来的科学的革命^[54]. 自动控制作为一门科学来研究, 当然也不例外.

首先, 自动控制是一门工程科学, 研究的是现实世界的问题, 解释和支撑的是工程上无处不在的控制技术. 长期以来, 工程技术人员为了解决问题, 在实践中摸索, 创造性地发掘出了一些行之有效的控制机制. 控制科学的首要任务是抽象地提炼工程师所面临的问题, 特别是抓住问题的本质和共性, 建立基本原理. 这里如果一旦出现偏差, 形成了误解, 或者没有抓住关键问题, 那么整个学科都会走偏, 造成理论与实际的脱节. 在科学的发展中走错路是不足为奇的, 关键是有没有勇气承认错误, 敢于像何毓琦先生那样坚持“不能付诸实施的就不是工程”⁵[55].

另一方面, 控制工程中得到的直观、经验与基本原理需要强有力的理论支持. 理论发展的前提是“学以致用”. 把控制理论作为应用数学的分支, 以被控对象的数学模型和二次型成本函数为起点, 通过推演确定控制器的参数, 虽然严谨, 但是并非抓住工程控制的本质问题, 还可能造成资源的浪费和对控制科学的误解. 沉浸在数学公式里面做控制, 被美国自动化学会现任主席R. Russell戏称为“娱乐数学”^[56]. 不难看出, 范式的选择是控制科学发展的重要问题.

为了下面叙述的方便, 借助下述二阶系统的例子介绍3个长期并存于控制科学的范式: 工业范式、模型范式和抗扰范式.

例 1 一个运动对象基于牛顿定律可简单地表示为

$$\ddot{y} = p(y, \dot{y}, w, u, t), \quad (3)$$

其中: y 为位置输出, u 为控制输入, w 为外扰. $p(y, \dot{y}, w, u, t)$ 描述系统的动态特性, 它的不确定性可以看成内扰. 对这个对象的控制设计目的是使 y 快速、准确地跟踪给定值 r .

4.1 工业范式(The industry paradigm)

工业控制要求控制算法简单、经济、实用、有效, 而工业过程本身复杂, 有大量的不确定性, 在很多应用中经常没有对象的数学模型可言, 控制器的设计常常是在式(3)中函数 $p(y, \dot{y}, w, u, t)$ 完全未知的情况下进行的. 以瓦特原理为出发点, 在比例控制之外, 为了克服静差加了积分项; 为了减少振动, 加了微分项; 形

²The principle in question has been pronounced defective and faulty, because, to cause the governor to act, it necessitates a change in the quantity to be kept constant.

³a world view underlying the theories and methodology of a particular scientific subject. Oxford Dictionary of English, 3rd Ed.

⁴Paradigm shift: a fundamental change in approach or underlying assumptions. Oxford Dictionary of English, 3rd Ed.

⁵“it is not engineering if it cannot be put into practice”.

成了我们熟悉的比例、积分与微分(PID)控制器:

$$u = k_P e + k_I \int e + k_D \dot{e}, \quad e = r - y. \quad (4)$$

从20世纪初到现在, PID始终在工业界占据着主导地位, 尽管它的有效性和稳定性在大部分工业场合都不能严格证明. 这么简单的反馈控制怎么能够用来控制一个复杂而不确定的系统呢? 主要原因是所有扰动最终都会引起输出偏离给定值. 而PID是基于瓦特原理, 根据误差信号的特性计算控制信号的, 不管误差是怎么来的. 这样一来, 相对于数学化的控制理论, PID的工程特点即一览无遗: 不依赖系统和扰动的数学模型; “天生的”抗扰性; 形式简单; 参数的物理意义明显, 等等. 另外, 工程师们在长期的实践中发展了一系列PID的改进和参数整定方法, 以适应不同 $p(y, \dot{y}, w, u, t)$ 和不同设计指标的要求.

PID在工业界的长盛不衰说明它是符合客观规律的, 是合理的. 否则, 它早被新技术淘汰出局了. 它也说明了控制科学的特点: 1) 控制科学是工程科学, 目的是改造世界; 2) 控制科学中实践往往超前于理论. 下面分别说明.

自然科学的目的是认识世界, 寻找客观规律. 按照自然科学的方式研究控制, 理所当然地先要给被控对象建模, 把它的规律搞得一清二楚, 然后再对其实施控制. 这就是韩京清先生所说的控制理论中的“模型论”. 人类对自然科学的研究, 为了搞清客观规律可以不惜代价, 但是工程不同. 韩京清先生在文献[1]中指出, 控制一个对象, 并不需要知道它的全局的动态特性, 即数学模型. 他说我们“并不大关心非线性对象的全局形态, 关心的焦点是如何根据一个过程提供的实时信息来搞好这个过程的控制问题”.

为什么呢? 首先, 控制科学不是应用物理学, 不是给世界建模; 其次, 它也不等同于应用数学, 不用根据一个想象中的成本函数和对象的数学模型, 推导控制率. 控制科学的焦点是客观世界的不确定性, 包括被控对象本身和它的操作环境; 挑战是怎样使控制系统在大量不确定性中, 以不变应万变, 使系统按照实际要求, 稳定运行. 尊重不确定性, 尊重诸如瓦特控制器和PID等工程发明, 认真地研究它们, 是控制科学的出发点. 这样我们就可以看到在控制科学中, 理论常常滞后于实践. 瓦特原理中的反馈控制的概念是百年后的发现; PID抑制不确定性的能力至今还没有很好的解释和理论指导; 自抗扰控制的理论验证是在它发明了十几年后才起步的.

如果我们再看得宽一点, 远一点, 就会发现这样的例子在历史上比比皆是: 爱迪生的电灯、特斯拉的交流电机、莱特兄弟的飞机、斯佩雷的自动驾驶仪, 等等. 正是这些发明创造, 激励了工程科学理论的创立

和发展. 我们相信, 今后控制技术的创新和发展必然给控制理论的研究不断提供新的素材和激励, 它们的交叉并进应该说是控制科学的理想.

4.2 模型范式(The model paradigm)

模型范式代表了现代控制论的思维方式和世界观, 可以追溯到60年代初卡尔曼的两篇原始文章. 在文献[57]一文中他提到两个研究动态系统不同的方式: 公理式的和经验式的. 数学家和理论物理学家采用的当然是前者. 因为技术上的伟大进步在很大程度上是依靠对这些系统的基于数学的研究^[58]. 现代控制论就是在这样的前提下提出和发展的, 建立的是纯理论的广义控制论^[58]. 对此, 苏联学者L. I. Rozonoer当时就提出质疑. 他说在还没有讲清楚问题是什么, 不知道怎么处理非线性之前, 不光广义理论就连基本原理都无从谈起. 更重要的是, Rozonoer说, 所谓“纯”理论, 任务是把现有的直观、模糊的概念给予清晰地、具有一般性地描述^[58]. 时隔50年, Rozonoer的疑问依然挥之不去. 一个学科的建立首先要把基本问题和原理说清楚, 并且要抓住问题的实质. 控制问题的实质与共性是现实世界中被控对象的不确定和非线性动态, 这是任何控制理论都不能回避的.

卡尔曼在文中提到, 广义控制论的最终目的是要回答两个问题: 1) 对于一个所期望的控制器类型, 需要什么样的信息, 要多少? 2) 对于不可改变的被控对象, 怎样根据控制的考虑描述它固有特性? 所谓控制器类型卡尔曼是指不同形式的最优控制; 所谓固有特性是指可控性和可观性. 通过建模、寻优, 卡尔曼从控制系统的问题中提炼出一般性的问题: 可控性、可观性及卡尔曼滤波器与线性二次型的最优控制的对偶性, 为现代控制论奠定了基础, 开启了控制理论发展史中的“模型论”时期. “建立控制系统的模型、分析系统的模型、依靠模型寻求控制率, 是这一时期主流的思维方式……系统的数学模型是研究问题的出发点(分析与设计)或归宿(建模与辨识)”^[1].

现在来看控制包括抗扰问题是怎样在模型论的框架下解决的. 在教科书里谈到的扰动一般是指外扰. 而扰动在很多控制设计的方法里并没有考虑到, 比如根轨迹法、极点配置、状态反馈、反馈线性化、Lyapunov法, 等等. 因为这些方法的前提是我们知道被控对象的数学模型和闭环系统的动态要求. 这样, 反馈控制的设计和分析也就可以作为一个数学问题来研究, 可以利用大量现有的数学工具发展出严谨的控制理论. 就拿上面的例子来说, 在模型范式下先要忽略外扰, 对对象建模, 找到式(3)中 $p(y, \dot{y}, w, u, t)$ 的解析表达式, 并把它近似为

$$p(y, \dot{y}, w, u, t) \approx q(y, \dot{y}) + bu, \quad (5)$$

⁶卡尔曼称之为“pure theory of control”和“general theory of control systems”.

且 $q(y, \dot{y})$ 和 b 已知. 再假设闭环系统的理想动态为

$$\ddot{y} = g(y, \dot{y}), \quad (6)$$

那么控制律就可写成

$$u = \frac{-q(y, \dot{y}) + g(y, \dot{y})}{b}, \quad (7)$$

这就是用教科书中的极点配置、状态反馈、反馈线性化等方法解决控制问题的思路.

然而, 基于数学模型的控制设计虽然理论上严谨, 应用上却受到限制, 关键在于不确定性. 而基于频率响应的鲁棒控制这一分支则应运而生. 在保持数学严谨的同时, 综合考虑控制设计的总体要求, 包括改变系统动态特性、改变输出信号行为、抗内扰、外扰、稳定性、降噪, 等等. 不足的是由于考虑的设计因素多, 要照顾到多种限制, 注意力分散, 造成设计过程繁琐, 控制器复杂, 抗扰能力有限. 更重要的是, 虽然鲁棒控制框架是针对不确定性而提出的, 但是为了满足小增益定理等前提, 它要求被控对象的数学模型基本准确, 所讨论的只是在小范围内的不确定性.

综上所述, 控制工程和理论的发展是沿着两个不同的范式进行的. 一方面工业界仍然以有着百年历史的PID技术为主导, 提高控制品质的途径也仅仅停留在参数整定和前馈设置等经验方法这一层次. 另一方面理论界以模型范式为基础, 以建模和优化为前提, 建立了应用数学又一个分支, 产生了宏大、严密的现代控制论. 遗憾的是由于对工程控制问题的理解和提炼的不足, 理论的发展与实践的距离越来越远. 以式(3)代表的运动控制为例, 工业控制基本采用黑箱法, 视 $p(y, \dot{y}, w, u, t)$ 为未知, 依靠瓦特原理, 经验地调节控制器参数. 而理论研究基本采用白箱法, 假设模型和成本函数已知, 严格地推导控制率.

控制工程的客观实际显然是在黑箱与白箱之间. 控制对象的动态特性即不是完全未知, 也不是完全已知. 工程师们通常对自己要控制的对象相当熟悉, 包括它的不确定性的特点, 但是这些知识常常很难用解析表达式来描述. 不少学者曾经试图采用智能控制的手段, 包括模糊控制和神经网络, 使控制器智能化. 但是发现虽然控制品质有所提高, 控制器却变得很复杂, 难以普及. 抗扰范式就是在这样的背景下出现的, 一个介于黑箱与白箱之间的灰箱法.

4.3 抗扰范式(The disturbance rejection paradigm)

控制科学研究的是一类动态系统的本质问题. 这类动态系统是开放的, 即它的动态是变化的而且受外力影响. 这里的外力有两种: 一种是人为的干预; 另外一种是我们不能左右的扰动. 控制科学关心的是如何系统地对它进行干预, 达到预期的效果. 而自然科学

则不同, 它研究的往往是封闭的动态系统. 研究者作为旁观者, 不对所研究的对象进行干预, 关心的是卡尔曼所说的动态系统不可更改的本质特性⁷[57-58]. 这里, 如果在标准型的框架下进行讨论, 控制科学与自然科学的区别则一览无遗.

标准型是线性系统理论的重要部分, 如能控标准型和能观标准型等. 而线性系统理论是现代控制论的基础, 是关于动态系统的一般性的理论, 并不限于自动控制. 给定一个线性系统的数学模型, 通过与输入信号无关的状态变换, 将它转换为某一个标准型, 给分析和综合带来便利.

韩京清先生根据反馈控制系统的特点, 早在1979年就首次提出了反馈系统标准型的概念^[2]. 与普通线性系统理论通过状态变换得到标准型的区别是, 在反馈系统的状态变换中, 系统的输入信号也可以是状态的函数. 这样, 不管系统是线性还是非线性, 在一定条件下, 都可以转换为积分器串联型, 这里简称其为韩氏型. 由于根据韩氏型设计控制器相当方便, 反馈系统的控制问题就转换为如何得到韩氏型的问题.

韩先生后来创建的自抗扰控制就是建立在韩氏型基础上的, 反映了他对控制系统独到的理解: 即系统动态的主体是输入信号与输出信号各阶导数的关系, 可以用串联积分器描述; 系统动态的复杂性和不确定性反映在各阶导数的变化规律以及外扰对它们的影响. 作为控制问题, 对象动态的主体是串联积分器; 串联积分器之外的动态是枝节问题, 处理好就行了. 据说韩先生把这个动态的主体与枝节问题比喻为鱼骨头和鱼刺的关系. 鱼刺虽然可以很复杂, 但是只要能一锅端地除掉就不影响大局了. 所谓“除掉”就是把串联积分器之外的动态, 根据输入输出信号估计出来然后用控制信号消掉, 强制性地将被控对象转换为韩氏型, 使控制器的设计大大简化. 这就是自抗扰控制的精髓, 也是抗扰范式的内涵!

以式(3)的运动系统为例, $p(y, \dot{y}, w, u, t)$ 的数学表达式可能完全未知. 但是这个运动控制的对象是人工设计、制造的, 为了满足给定的性能要求. 它输入输出之间一定有因果关系. 以机电系统为例, 输入 u 是电机的电流, 产生相应的力; 而力作用于物体则产生加速度, 即输出的二阶导数 \ddot{y} . 在设计过程中, 根据负载物体的轻重和运动中加速度的要求, 工程师们先要选定扭矩足够大的电机. 不考虑鱼刺(非线性摩擦力和外扰, 等等), 鱼骨头就是 u 与 \ddot{y} 的比例关系:

$$\ddot{y} = bu, \quad (8)$$

其中 b 是电机扭矩参数与负载物体质量的商, 是需要大致知道的⁸. 这就是运动系统的韩氏型. 对它进行控

⁷ “Intrinsic properties” that “characterize a given unalterable plant”.

⁸ 在商用运动控制产品中, 对 b 的简便辨识的功能是很常见的.

制设计与参数整定很方便,通常用式(4)中的P和D项做极点配置就够了。

但是式(8)只是式(3)的一部分. 它们的差就是系统的不确定性,被韩先生称为总扰动,表示为

$$f(y, \dot{y}, w, t) = p(y, \dot{y}, w, u, t) - bu, \quad (9)$$

它是对象的内扰(非线性摩擦力等)和外扰(w)的总和. 这时式(3)可改写成

$$\dot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + bu. \quad (10)$$

这样,式(3)的控制问题就被分解为式(8)的PD控制器设计和式(10)的抗扰问题. 把 $f(y, \dot{y}, w, t)$ 定义为状态一举极具创意,也曾令人难以理解. 正是在这里,韩先生迈出了控制论发展的重要一步: 状态概念的广义化.

状态的定义在卡尔曼最初的文章^[58]乃至后来的教科书中,比如文献[59–61],是功能性的,即如果我们知道系统过去某一时刻(t_0)的“状态”和这一时刻后的输入信号,就可以计算出系统在将来任意时刻的状态和输出. 当然,前提是已知系统的精确模型. 以式(10)的系统为例,设系统状态为 $x = [y, \dot{y}]^T$,如果 $f(y, \dot{y}, w, t)$ 和 b 已知. 那么给定 $x(t_0)$ 和 $u(t)$, $t \geq t_0$, $x(t)$, $t \geq t_0$ 可以通过解式(10)得到.

抗扰范式和模型范式的主要区别在于如何看待 $f(y, \dot{y}, w, t)$. 前者视它为控制器要处理的未知量,后者视它为一定先要通过建模而知道的,描述系统动态的数学表达式. 韩先生创造性地提出,动态和状态之间并没有什么根本不同. 特别对于未知动态,它可以被看成模型的缺陷,也可以被看成我们需要的信息,即状态. 把未知动态 $f(y, \dot{y}, w, t)$ 看成状态,建模问题被巧妙地转换为状态估计问题. 以式(10)为例,如果我们研究它的目的是控制,那么只需要把未知动态作为信息实时地从已知的输入输出信号中提取出来,即 $\hat{f}(t) \approx f(y, \dot{y}, w, t)$. 这样,式(3)就可以通过

$$u = -\frac{\hat{f}(t)}{b} + u_0 \quad (11)$$

近似地转化为韩氏型,再进行控制设计. 换言之,如果式(9)中的总扰动 $f(y, \dot{y}, w, t)$ 可以实时地估计出来,那么式(3)所代表的复杂的控制问题就可以转化成式(8)这个控制问题的标准型. 这里关键是视总扰动为状态,然后借用现代控制论中的状态观测器原理,先对式(10)建立状态空间表达式,并把状态的定义扩展到 $f(y, \dot{y}, w, t)$. 这样 $\hat{f}(t) \approx f(y, \dot{y}, w, t)$ 就可从通过所谓的扩张状态观测器得到.

以上介绍的抗扰范式是通过自抗扰控制技术的提炼得到的. 它的思路与线性系统理论的多项式矩阵法相似,即把一个一般的控制问题先转换为一个控制问题的标准型. 不同的是在线性系统理论中这一转换

是通过矩阵变换得到的;在抗扰范式中,它是通过对扰动的实时估计、补偿得到的. 而对于标准型的控制设计可以标准化,所有模型范式中的方法都可以用得上. 这样,抗扰范式的思路就很清楚了:

A1) 根据物理概念选择控制对象的标准型,如式(8),并设计控制器;

A2) 实时的估计总扰动,即标准型和控制对象的差,并借用控制手段将其抵消.

这样,第一步A1)回答了控制工程的一个基本问题: 设计控制器的前提是什么? 或者说我们需要知道什么? 这里以式(8)为例,韩氏型的一般形式为

$$y^{(v)} = bu \quad (12)$$

是被控对象的理想形式. 其中 v 可以对应于被控对象的相对阶,也可以比它低^[62–63]. 特别是Fliess认为式(12)一般取一阶或二阶就够了^[63]. 笔者的建议是 v 的取法要尽量符合物理意义. 比如运动控制, u 代表力,与加速度成正比,这时 v 可取2,即使是谐振频率很低的柔性运动对象,因为高阶导数项作为不确定性,同样可以甩入 f 项^[62].

在抗扰范式下控制设计的前提是笔者对对象的物理过程有一个直观的理解,能以此建立它的标准型. 这里依靠的是工业范式的直观. 一旦有了控制问题的标准型,对它的控制既可以采用简单的PID,也可利用依靠模型的方法找到更佳的控制方案. 以式(5)为例,如果对象的部分数学模型已知,即 $q(y, \dot{y}) + bu$,控制器按模型范式也已给定,见式(7). 那么系统的总扰动从式(9)变为

$$f(y, \dot{y}, w, t) = p(y, \dot{y}, w, u, t) - (q(y, \dot{y}) + bu). \quad (13)$$

同样,通过对这个扰动的实时估计, $\hat{f}(t) \approx f(y, \dot{y}, w, t)$, 式(7)可修改为

$$u = \frac{-(\hat{f}(t) + q(y, \dot{y})) + g(y, \dot{y})}{b}, \quad (14)$$

从而实现抗扰的目的. 这样做的好处是,当模型比较准而且扰动有限的时候,需要估计的总扰动的范围大大减低,也就是状态观测器的负担大大下降,带宽可以降低,观测器的输出可以做得比较平滑,稳定裕度较大,对噪声敏感度较小,等等.

由此可见,抗扰范式给工业控制设计提供了一个崭新的框架,反映了一个解决实际问题的切实可行的思维方式,在工业范式的感性思维和模型范式的理性思维之间建立桥梁;在黑箱法和白箱法之间建立了灵活、直观,而且逐渐完善、严密的灰箱法. 我们不用再刨根问底,非要把被控系统搞得一清二楚再设计控制器;也不用隔靴搔痒般调PID. 对于对象的动态,知道多少就用上多少;不知道的动态信息则实时提取. 可

见, 抗扰范式给新一代控制技术的发展提供了一个新框架。

5 自抗扰控制思想溯源(Active disturbance rejection control: the origin of the idea)

上面提到的R. Brockett先生的领悟, 道出了控制科学的出发点和目的地: 系统的不确定性. 这是因为控制科学所研究的对象是开放的, 与外界相交流的. 控制是对这一交流的干预, 使系统在内部和外部的不确定性中, 保持稳定运行, 满足设计要求. 理想的控制系统能够以不变应万变, 不管是系统本身的动态变化还是外界对系统作用的变化, 都能始终如一地应付自如. 这样, 控制系统设计的基本矛盾是不是反映在系统品质的精细与系统动态的粗略? 以上介绍的3个范式反映了解决同一矛盾的不同框架.

自抗扰控制是抗扰范式的范例. 它既是一个迥然不同的控制理念, 也是一门新兴的控制技术. 回顾它的历程, 展望它的未来, 对未来控制论的发展或许会有所启示.

5.1 源头活水(The origin)

所谓自抗扰, 也可以理解为自发、主动、直接地, 而不是被动、间接地去处理扰动, 方法是设法尽早得到扰动信息, 尽快地把它补偿掉. 这一概念的雏形早在18世纪末、19世纪初的蒸汽机时代就出现了, 是法国学者Jean-Victor Poncelet为了改善瓦特蒸汽机的控制品质, 针对其中的飞锤调速器滞后的缺陷提出的改进方案, 特点是直接测量扰动, 在它还没有影响蒸汽机的速度前调整蒸汽流量, 补偿扰动^[34]. Poncelet虽然给出了设计方案, 却没能实施. 一百多年后, 苏联学者G. V. Schipanov在Poncelet的基础上发展的不变性原理, 意图是通过对扰动的测量或近似, 对它进行补偿, 使被控对象的动态特性不变^[35]. 60年代流行于苏联的双通道控制就是基于不变性原理的技术^[4, 35]. 不过, 不变性原理在70年代后逐渐销声匿迹了.

我国学者万百五先生早在1965就提到中国古代指南车与不变性原理和双通道原理的关系^[64]. 韩先生60年代在苏联留学时接触了以不变性原理为代表, 以扰动问题为核心的独特的控制思想, 为日后创建自抗扰埋下伏笔. 文革后的80年代, 百废俱兴, 韩先生主持、参与了现代控制理论的普及工作, 以及“中国控制系统计算机辅助设计软件系统”的开发, 开创了线性系统理论的构造性方法. 正是在他的理论研究进入高峰的时候, 以《控制理论——模型论还是控制论》一文^[1]为转折点, 他开始反思现代控制理论, 质疑“模型论”. 他指出, “调节理论和导引理论建立控制律并不完全依靠系统的具体数学模型”, 而且“控制系统中线性与非线性并没有分明的界限; 控制的目的是对一个‘过程’的某种优化, 并不是‘全局’控制”.

以运动控制为例, 他的广义扰动的概念以及自抗扰控制思想的雏形在1989年^[1]就一览无遗了. 他说“自抗扰性”是“不变性原理”和“内模原理”的发展, 优点是“既不需要直接检测外扰, 也不需要预先知道外扰模型”^[3]. 这样, 一个富于活力的抗扰理念, 横跨东西, 历经数百年, 绵延不断、几经曲折, 最后在中国落地生根、开花结果.

5.2 “自抗扰性”与“防患于未然”(Nature of active disturbance rejection: nipping the problem in the bud)

自抗扰控制是针对现有控制技术的不足而进行的新尝试. 从式(4)可以看出PID的抗扰机制明显是被动的, 因为此类“基于误差而消除误差”的控制器必须等到扰动作用于对象而产生误差后才能反应. 而在模型范式下, 一方面通过建模把未知变为已知, 不确定的变成确定的; 另一方面, 对于模型外的扰动, 抗扰也是被动的. 介于二者之间, 有些抗扰方法甚至要求扰动的数学模型是已知的. 这些根据数学模型推演而得到的控制器显然不是处理系统在数学模型之外大量不确定性的有效办法.

所谓“自抗扰”就是要主动从被控对象的输入输出信号中提取扰动信息, 然后尽快地用控制信号把它消除, 从而大大降低它对被控量的影响. 从频域上看, 这样的控制手段在相位上远远超前于一般“基于误差”而设计的控制器. 这也是为什么人们发现自抗扰控制器频率响应有突出的特点. 从式(11)可见, 在理想的情况下, 扰动在还未影响输出之前就被控制量抵消了, 在相位上比式(4)的PID超前很多. 由此看来, 自抗扰中的“自”被翻译为active(主动), 突出了自抗扰控制思想的特点. 而主动优于被动是自抗扰技术一个与其他技术的主要区别. 在式(3)的运动控制范例中, 时变、不确定和非线性的摩擦力是一种内扰, 它的变化比运动物体位置的变化在相位上超前近180°. 怎么让位置尽量不受这种扰动的影响呢? 自抗扰的思路就是要在扰动影响位置前想办法得到它的信息, 然后用控制信号把它抵消掉. 显然, 这比主要基于位置误差的控制率在相位超前很多. 有点古人讲的“防患于未然”, 以及“上医治未病”的味道. PID对付的是已经发生了的误差, 治的是已病, 而自抗扰控制则是要在大误差出现前把造成误差的因素(扰动)主动地消除掉, 治的是未病.

直觉告诉我们, 与其亡羊补牢, 不如防患于未然. 在大量实际应用里发现主动地抗扰除了能提高稳定性和控制品质外, 更可以降低能量的损耗. 控制品质的提高表现在过渡时间和误差的减小, 跟踪精度的提高和超调幅度的降低. 除此之外, 仅节能一项就很可观. 比如在北美一家设备一流的生产线上, 我们进行

了PID与自抗扰的比较. 结果发现除了产品质量的显著改进外, 能量消耗也降低50%以上^[8-9]! 道理很直观: 在系统运行正常时, 输出接近给定值, 跟踪误差小, PID控制器的输出基本上来源于其积分项和前馈. 面临扰动时, 前馈无能为力, 而积分项反应滞后, 控制器一直要等到式(4)中的比例项有显著变化时, 也就是说跟踪误差较大时才会有所反应. 由于系统的任何变化都会消耗能量, 跟踪误差增加时耗能, 跟踪误差下降时也耗能. 这就是随着自抗扰控制品质的提高, 耗能也大大下降的原因所在, 见图1.

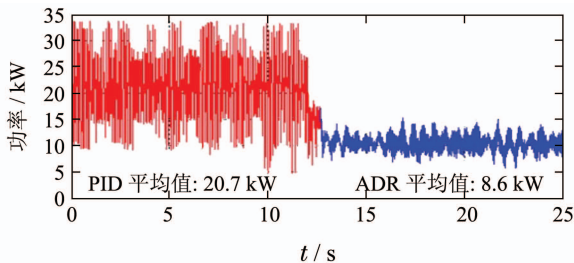


图1 在生产线上PID与自抗扰的功率比较^[9]

Fig. 1 Power consumption comparison between PID and ADRC in a production line^[9]

5.3 自抗扰的自然而然(The elegance of active disturbance rejection)

为了把自抗扰控制思想介绍到国外, 主动抗扰的提法突出了它在技术上的特点, 也使它的原理更容易被接受. 但是主动抗扰并不是自抗扰的全部内涵. 或许自抗扰的“自”更应该理解为自然. 在思维方式上自抗扰显现了东方文化的特点. 自然是中华文化特别是道家的核心概念. 老子早有“人法地, 地法天, 天法道, 道法自然”的教诲, 启发人们遵循自然规律. 而庄子在《养生主——庖丁解牛》一文中更是把自然而然的理想描述得淋漓尽致. 百年来人们在自动控制领域, 格物致知, 控制的理念和理论从无到有、蓬勃发展, “为学日益”. 而自抗扰控制的发展则相反, 从繁到简, “为道日损”. 它吸取了古典控制和现代控制理论的精华, 特别是瓦特原理和状态观测器, 用一个最简单的串联积分器标准型来描述对象, 设计控制器, 把其他未知部分都作为扰动来补偿, 大大地简化了问题, 去粗取精, 把握了问题的关键.

这样, 在理论和概念上, 就可以不再纠缠于控制对象动态的线性-非线性、时变-时不变、确定-不确定等人造的划分, 得以集中精力去思考、解决控制工程的核心问题: 抗扰. 而抗扰问题的解决则在更大范围内解决了现代控制论中普遍受到关注的问题, 比如自适应问题和鲁棒控制问题, 它们的实质都是抗扰, 只是问题的描述和解决方式不同而已. 比如, 在自适应的框架里, 内扰反映于对象模型的参数变化, 抗扰变成参数估计的问题. 而鲁棒控制则是在对象模型基本知道又存在少量动态不确定性的前提下, 讨论怎样保

证闭环系统的稳定性. 基于实时估计、补偿的自抗扰技术为自适应和鲁棒问题的解决提供了一个新的, 自然而然的途径, 不仅直观、简易、有效, 又让人想起古人“守约而施博”的教诲.

工业实践一再证明, 解决了抗扰这个主要问题, 其他问题诸如控制品质、稳定性、能量消耗和机械磨损就迎刃而解了, 自然而然、事半功倍! 随着自抗扰应用的推广, 很多过去棘手的问题现在很轻松地就解决了, 效果常常让人惊讶. 一位北美工控机制造商的技术主管在了解了自抗扰控制后的第一个评价是“优美”, 因为他看到自抗扰控制是一个简单、巧妙的算法, 并且同时解决了他们的几个棘手的问题. 而自抗扰的理念对工程技术人员来说既直观, 又抽象. 直观是因为它基于人们对被控对象物理特性的了解: 除了控制信号外, 还有哪些因素对输出有影响? 这是工程师能想到的. 抽象的是自抗扰对怎样估计和抵消这些因素的总和给出了一个一般解, 而且这个解在工程上越来越多的领域里正在得到验证. 因为既直观又抽象, 既具体又一般, 这才使人感到“优美”.

自抗扰控制的发展历程在学术研究的方法论上也很有启示. 它是先人的思维不断穿梭于理性和感性的历程. Poncellet直觉地发现反馈控制的被动, 提出主动测量、补偿扰动的思路. 百年后通过苏联学者, 在理性上升为不变性原理, 在工程上产生了双通道控制技术. 然而, 控制是所有工程学科共有的问题, 反映了工程问题的共性, “类万物”, 甚至被称为是工程领域中的形而上学. 在过去几十年里, 控制理论的研究基本上是按照西方数学研究的思路, 从公理出发, 通过推演, 建立一个封闭系统, 就像欧几里德的《几何原本》, 走的是纯理性的路线. 而这个系统与客观世界怎样联系起来则是个挑战. 即使是上述不变性原理和双通道控制技术, 也是基于对象的数学模型, 解决抗外扰的问题. 自抗扰则不然, 它把一个数学问题, 用中国学者特有的构造性方法, 转化为一个数量问题; 把一个过去要建模、分析的问题转化为一个可以用计算机实时计算、处理的问题. 这体现了“长于计算, 以算法为中心”、“数学理论密切联系实际”等中国古代数学的特征. 自抗扰控制体现了知行合一的特点, 把我们对对象的“知”和对它进行的控制设计的“行”紧密结合. 这样的“知行合一”也许正是为什么自抗扰会在中国自然而然地落地生根、开花结果的原因.

6 展望(Outlook)

韩京清先生1989年以其深刻的洞察力提出了控制理论的模型论和控制论之分, 即肯定了模型论的发展和价值, 也指出了它的不足和发展控制论的迫切需要. 韩先生毕尽余生, 创建、发展了自抗扰控制, 提出了有中国特色的控制理念. 自抗扰控制不仅仅是一门实用的技术, 更是一个独特、深刻的思想. 它唤醒了我们的

质疑精神, 启发我们去询问什么是控制论? 它的本质问题和基本原理是什么? 它要研究什么? 它的前提是不是合理? 而只有当我们试图去回答这些问题时, 才会发现自抗扰控制的理念是何等鲜活, 才会去寻找它的源头活水, 才会试图在我们博大精深的文化中追寻它的根基。

“国家生命所系, 实系于文化, 而文化根本则在思想”⁹。在自动控制这个国民经济中举足轻重的横断学科, 韩先生给我们留下了一笔丰富的学术遗产, 核心思想是自抗扰控制, 更体现了“君子务本”的学术精神。希望控制界的同仁们, 一起关心控制学科得以安身立命的根基, 秉承中华文化知行合一的传统, 为中国控制界的“本立而道生”, 做出自己义不容辞的贡献。

参考文献(References):

- [1] 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 Jingqing. Control theory, is it a model analysis approach or a direct control approach? [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 1989, 9(4): 328 – 335.)
- [2] 韩京清. 线性控制系统的结构与反馈系统计算 [C] // 全国控制理论及其应用论文集. 北京: 科学出版社, 1981: 43 – 55.
(HAN Jingqing. Structure of linear control systems and the feedback system computation [C] // *Proceedings of National Control Theory and Applications*. Beijing: Science Press, 1981: 43 – 55.)
- [3] 韩京清. 控制系统的鲁棒性与 Gödel 不完备性定理 [J]. 控制理论与应用, 1999, 16(增刊): 149 – 155.
(HAN Jingqing. The robustness of control system and Gödel's 'Incompleteness theorem' [J]. *Control Theory & Applications*, 1999, 16(Suppl.): 149 – 155.)
- [4] 韩京清. 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 Jingqing. *Active Disturbance Rejection Control Technique—the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.)
- [5] HAN Jingqing. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900 – 906.
- [6] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller-tuning [C] // *Proceedings of the 2003 American Control Conference*. Denver: IEEE, 2003, 6: 4989 – 4996.
- [7] TIAN G, GAO Z Q. Benchmark tests of active disturbance rejection control on an industrial motion control platform [C] // *Proceedings of the 2009 American Control Conference*. St. Louis, MO: IEEE, 2009: 5552 – 5557.
- [8] LineStream Technologies: Advanced Control, Made Simple, Accessed on Oct.1st, 2012 at: http://www.polymerohio.org/index.php?option=com_content&view=article&id=352:linestream-technologies-advanced-control-made-simple&catid=1:latest-news&Itemid=61.
- [9] ZHENG Q, GAO Z Q. An energy saving, factory-validated disturbance decoupling control design for extrusion process [C] // *World Congress on Intelligent Control and Automation*. Beijing: IEEE, 2012: 2891 – 2896.
- [10] LineStream Technologies signs licensing deal with Texas Instruments, *The Plain Dealer*, July 12th, 2011.
- [11] Achieve improved motion and efficiency for advanced motor control designs in minutes with TI's new InstaSPIN(TM)-MOTION technology, *The Wall Street Journal*, April 18, 2013 at <http://online.wsj.com/article/PR-CO-20130418-907338.html?mod=google-news-wsj>.
- [12] TIAN G GAO Z Q. Frequency response analysis of active disturbance rejection based control system [C] // *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Control, Applications Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control*. Singapore: IEEE, 2007: 1595 – 1599.
- [13] ZHENG Q, GAO L, GAO Z Q. On stability analysis of active disturbance rejection control for nonlinear time-varying plants with unknown dynamics [C] // *IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, LA: IEEE, 2007: 3501 – 3506.
- [14] XUE W C, HUANG Y. On Frequency-domain analysis of ADRC for uncertain system [C] // *Proceedings of the 2013 American Control Conference*. Washington, DC: IEEE, 2013: 6637 – 6642.
- [15] ZHAO C, HUANG Y. ADRC based input disturbance rejection for minimum-phase plants with unknown orders and/or uncertain relative degrees [J]. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2012, 25(4): 625 – 640.
- [16] XUE W C, HUANG Y. Comparison of the DOB based control, a special kind of pid control and ADRC [C] // *Proceedings of the 2011 American Control Conference*. San Francisco, CA: IEEE, 2011: 4373 – 4379.
- [17] XUE W C, HUANG Y. On performance analysis of ADRC for nonlinear uncertain systems with unknown dynamics and discontinuous disturbances [C] // *Proceedings of the 2013 Chinese Control Conference*. Xi'an, China: IEEE, 2013: 1102 – 1107.
- [18] ZHENG Q, GAO L, GAO Z Q. On validation of extended state observer through analysis and experimentation [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 2012, 134(2): 024505.1–024505.6.
- [19] ZHOU W, ZHAO S, GAO Z Q. A stability study of the active disturbance rejection control problem by a singular perturbation approach [J]. *Applied Mathematical Sciences*, 2009, 3(10): 491 – 508.
- [20] ZHENG Q, CHEN Z, GAO Z Q. A practical approach to disturbance decoupling control [J]. *Control Engineering Practice*, 2009, 17(9): 1016 – 1025.
- [21] YOO D, YAU S, GAO Z Q. Optimal fast tracking observer bandwidth of the linear extended state observer [J]. *International Journal of Control*, 2007, 80(1): 102 – 111.
- [22] GUO B Z, ZHAO Z L. On the convergence of an extended state observer for nonlinear systems with uncertainty [J]. *Systems & Control Letters*, 2011, 60(6): 420 – 430.
- [23] GUO B Z, ZHAO Z L. Weak convergence of nonlinear high-gain tracking differentiator [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58(4): 1074 – 1080.
- [24] GUO B Z, ZHAO Z L. On convergence of the nonlinear active disturbance rejection control of the active disturbance rejection control for MIMO systems [J]. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2013, 51(2): 1727 – 1757.
- [25] SIRA-RAMÍREZ H. Active disturbance rejection control: historical, perspective and new horizons [C] // *The 15th Latinamerican Control Conference, Plenary Talk*. [S.l.]: [s.n.], 2012.
- [26] 黄一, 张文革. 自抗扰控制器的发展 [J]. 控制理论与应用, 2002, 19(4): 485 – 492.
(HUANG Yi, ZHANG Wenge. Development of active disturbance rejection controller [J]. *Control Theory & Application*, 2002, 19(4): 485 – 492.)

⁹ 马一浮, 《泰和宜山会语》, 辽宁教育出版社, 1998.

- [27] 黄一, 薛文超, 赵春哲. 自抗扰控制纵横谈 [J]. 系统科学与数学, 2011, 31(9): 1111 – 1129.
(HUANG Yi, XUE Wenchao, ZHAO Chunzhe. Active disturbance rejection control: methodology and theoretical analysis [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2011, 31(9): 1111 – 1129.)
- [28] 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 Yi, XUE Wenchao. Active disturbance rejection control: methodology, applications and theoretical analysis [J]. *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2012, 32(10): 1287 – 1307.)
- [29] 中国科学院系统控制重点实验室. 自抗扰控制技术资料选编——纪念韩京清先生逝世五周年 [M]. 北京: 中国科学院, 2013.
(Key Laboratory of Systems and Control, CAS. *An Anthology on Active Disturbance Rejection Control—In Memory of Professor Jingqing Han on the 5th Anniversary of His Passing* [M]. Beijing: CAS, 2013.)
- [30] BLACK H. Inventing the feedback amplifier [J]. *IEEE Spectrum*, 1977, 14: 54 – 60.
- [31] BROCKETT R. New issues in the mathematics of control [M] // ENGQUIST B, SCHIMID W. *Mathematics Unlimited—2001 and Beyond*. Berlin: Springer, 2001: 189 – 220.
- [32] MINORSKY N. Directional stability and automatically steered bodies [J]. *Journal of the American Society of Naval Engineers*, 1922, 42(2): 280 – 309.
- [33] BENNET S. *A History of Control Engineering: 1800–930* [M]. Peregrinus: the Institution of Electrical Engineers, 1979.
- [34] PONCELET J. *Introduction a la Mecanique Industrielle, Physique ou Experimentale* [M]. 3rd Edition. KRETZ M, ed. Paris: Gauthier-Villars, 1870.
- [35] PREMINGER J. Some considerations relating to control systems employing the invariance principle [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1964, 9(3): 209 – 213.
- [36] MAXWEL J C. On governors [J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1867, 16: 270 – 283.
- [37] BENNETT S. A brief history of automatic control [J]. *IEEE Control Systems*, 1996, 16(3): 17 – 25.
- [38] TRINKS W. *Governors and Governing of Prime Movers* [M]. New York: D Van Nostrand Company, 1919.
- [39] NEEDHAM J. *Science and Civilisation in China: Volume 4, Physics and Physical Technology* [M]. Part 2, Mechanical Engineering. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1965: 286.
- [40] FRANCIS B A, WONHAM W M. The internal model principle for linear multivariable regulators [J]. *Applied Mathematics and Optimization*, 1975, 2(2): 170 – 194
- [41] HOSTETTER G H, MEDITCH J. On the generalization of observers to systems with unmeasurable, unknown inputs [J]. *Automatica*, 1973, 9(6): 721 – 724.
- [42] GARCIA, CARLOS E, MANFRED M. Internal model control: a unifying review and some new results [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1982, 21(2): 308 – 323.
- [43] OHISHI K, NAKAO M, OHNISHI K, et al. Microprocessor-controlled DC motor for load-insensitive position servo system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1987, 34(1): 44 – 49.
- [44] UMENO T, HORI Y. Robust speed control of DC servomotors using modern two degrees-of-freedom controller design [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1991, 38(5): 363 – 368.
- [45] SHINSKEY F G. *Process Control Systems* [M]. New York: McGraw-Hill, 1967.
- [46] NEWTON G C, LEONARD G A, JAMES K F. *Analytical Design of Linear Feedback Controls* [M]. New York: Wiley, 1957.
- [47] MAYR O. *The Origin of Feedback Control* [M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 1970.
- [48] NYQUIST H. Regeneration theory [J]. *Bell System Technical Journal*, 1932, 11: 126 – 147.
- [49] BODE H W. Feedback—The history of an idea [M] // BELLMAN R E, KALABA R E. *Selected Papers on Mathematical Trends in Control Theory*. New York: Dover Publications, 1964: 106 – 123.
- [50] 黄琳. 为什么做, 做什么和发展战略——控制科学学科发展战略研讨会约稿前言 [J]. 自动化学报, 2013, 39(2): 97 – 100.
(HUANG Lin. Future development in control science: why, what and strategy [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(2): 97 – 100.)
- [51] 钱学森, 宋健. 工程控制论 [M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 2011.
(QIAN Xuesen, SONG Jian. *Engineering Cybernetics* [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2011.)
- [52] LOZIER J. Save the JACC [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1967, 12(4): 349 – 350.
- [53] GRAHAM D, RICHARD L C. The synthesis of ‘optimum’ transient response: criteria and standard forms [J]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, 1953, 72(5): 273 – 288.
- [54] KHUN T. *The Structure of Scientific Revolutions* [M]. 3rd ed. Chicago: University of Chicago Press, 1996.
- [55] HO Y C. Education of control engineer—Lessons I have learned [J]. *IEEE Control System Magazine*, 1990, 10(3): 135 – 136.
- [56] RUSSELL R R. Letter to authors on publishing in ISA transactions [J]. *ISA Transactions*, 2012, 51(1): 2 – 10.
- [57] KALMAN R E. Canonical structure of linear dynamical systems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1962, 48(4): 596.
- [58] KALMAN R E. On the general theory of control systems [J]. *IRE Transactions on Automatic Control*, 1959, 4(3): 110 – 110.
- [59] KAILATH T. *Linear Systems* [M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1980, Vol.1.
- [60] ZADEH L A, CHARLES D A. *Linear System Theory: the State Space Approach* [M]. New York: McGraw-Hill, 1963.
- [61] CHEN C. *Linear System Theory and Design* [M]. New York: Oxford University Press, 1999.
- [62] ZHAO S, GAO Z Q. An active disturbance rejection based approach to vibration suppression in two-inertia systems [J]. *Asian Journal of Control*, 2013, 15(2): 350 – 362.
- [63] FLIESS M, JOIN C. Model-free control [J]. *International Journal of Control*, 2013, 86(12): 2228 – 2252.
- [64] 万百五. 我国古代自动装置的原理分析及其成就的探讨 [J]. 自动化学报, 1965, 3(2): 57 – 65.
(WAN Baiwu. On certain automatic equipments in ancient China—a discussion of their principles and achievements [J]. *Acta Automatica Sinica*, 3(2): 57 – 65.)

作者简介:

高志强 (1960–), 男, 副教授, 主要从事控制论和自抗扰控制方面的研究, E-mail: z.gao@ieee.org.