

控制工程的抗扰范式

高志强

美国克里夫兰州立大学, 克里夫兰, OH 44115

E-mail: z.gao@ieee.org

摘要:控制工程的内容可归纳于三个范式:工业范式,模型范式,抗扰范式。本文围绕怎样抗扰这个问题将控制设计的现有方法进行了归类、比较。工业范式反映了近百年来,人们在实践中寻找有效控制手段的途径;模型范式适合思维严谨的学者,在一个公理系统的框架内,基于给定的数学模型和控制目标,推演反馈控制律;抗扰范式则回到控制问题的本质,即控制问题就是抗扰问题,为怎样抗扰这个基本问题,为怎样看待、理解自抗扰控制技术,提供了一个新的思路。自抗扰的“自”英文翻译为“主动”,又有“自然而然”之意,这在理论和实践上都很有意义。

关键词: 抗扰, 范式, 方法论, 自抗扰控制, 控制工程

On Disturbance Rejection Paradigm in Control Engineering

Abstract: There are three paradigms in control engineering: the industry paradigm, the model paradigm and the disturbance rejection paradigm, from which the current design methods are illuminated and compared in this paper. While the industry paradigm is empirical and the model paradigm rigorous, the disturbance rejection paradigm comes back to the essence of controls: rejecting disturbance, i.e. uncertainties, and provides a refreshing perspective on Active Disturbance Rejection Control, with many implications, technologically and conceptually.

Key Words: Disturbance Rejection, Paradigm, Active Disturbance Rejection Control, Control Engineering

1 引言(Introduction)

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。而学科的发展常常是在一定范式之下长时期积累的过程。但是不管积累的多么丰富、多么五彩缤纷,人们最终总会不可避免地对外前提和范式提出疑问,就象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。结果是一个新的范式的出现和随之而来的科学的革命^[1],控制科学也不例外。

一方面,控制是一门在工程上无处不在的技术。是工程技术人员为了解决问题,在实践中摸索,积累经验,创造性地发掘出的一些行之有效的控制机制,在工业发展中起了决定性的作用。对此我们先称之为**工业范式**。工业革命以来,这个范式已经持续了两百多年了。比例积分微分(PID)控制器以及至今层出不穷的PID参数整定方法是它的代表。

另一方面,控制是理论科学,是应用数学的分支。它以被控对象的数学模型为起点,建立设计目标和控制器结构的数学表达式,通过推演确定控制器的参数。对此我们先称之为**模型范式**。控制理论在模型范式下的发展已逾半个世纪之久了,产生了古典控制论和现代控制论。

一个强调经验和实用,另一个强调理性和严谨,这就是两个范式前提的不同。而随之而来的是问题、方法、目标的不同。在自抗扰控制的启发下,通过反思控制问题的实质,本文讨论一个新的前提:即控制问题的

核心是客观世界的不确定性,而不确定性问题在工程上就是抗扰问题。在这个前提下,本文提出并讨论**抗扰范式**,目的是①综合工业和模型范式,吸取二者的精华,以自抗扰控制为启示,展示一条解决问题的新思路;②与各行各业的工程技术人员在工业范式上对话,推广自抗扰的应用,找到既能提高控制品质又能节约能源的手段;③与控制理论工作者在模型范式上对话,讲清抗扰问题的内涵以及发展抗扰理论的必要性。我们希望大家都来关心这个事情,都来参加关于范式的讨论、对话。而对话的基础是我们对“什么是控制?”这个问题的共识。

2 控制问题就是抗扰问题

什么是控制是业内经常谈起的话题,众说纷纭,至今未了。近来,在美国IEEE Control System Magazine上及其网页上又有新的提法^[2]。可以理解的是控制在各行各业的广泛应用已使人们难以简单、清楚地说明它到底是什么,在做什么,解决了什么问题。也许比较容易接受的提法是控制就是合理地利用反馈来改善动态系统的特性。控制史学者O. Mayr提到整个控制领域都基于一个单一的观念:反馈^[3]。控制领域的发展过程不过是对改善系统的动态特性这个课题根据不同的假设,找到各种反馈设计方法而已。

然而,改变动态系统的特性并非只有反馈这一条路。在工业控制中,特别是过程控制里,利用前馈改变系统动态特性的例子比比皆是。那么反馈与前馈有什么根本不同呢?对此,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”^[4]。换句话说,

反馈的主要功能是抑制不确定性。事实上,对一些不确定性小的被控对象,比如步进马达,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。而闭环反馈则是从瓦特发明蒸汽机以来的两百年中,工程师们在实际应用中找到一个简单实用的控制手段。当初人们惊奇的发现,一个简单的负反馈或者是比例积分微分控制器(PID)就有能力抑制被控对象里大量的不确定性。反馈放大器就是个例子。

反馈放大器是H. Black 1927年发明的,解决的问题是放大器中真空管的非线性以及它所带来的信号失真。Black发现用一个很小的负反馈就能使失真下降50分贝^[5],不需建模,也不用做反馈线性化。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为放大器的非线性不确定放大系数, h为反馈系数。那么当回路增益满足

$$hA \gg 1 \quad (1.1)$$

的条件时,该放大器的动态特性可近似为

$$\frac{A}{1+hA} \approx \frac{1}{h} \quad (1.2)$$

即在满足(1.1)的条件下,放大器的闭环特性与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(1.1)和(1.2)仍然成立。这样,放大器的放大倍数依然可以很高,其不确定性在很大范围内都被负反馈抑制住了,效能极佳。

H. Black 成功的主要原因是被控对象的增益非常高,一个微弱的反馈信号就能满足(1.1),从而彻底改善了放大器的动态特性,一巧破千斤,显示了反馈控制的巨大潜力。它表明:①负反馈能用来改变系统动态;②当开环增益很高时,满足(1.1),闭环响应与被控对象几乎无关,达到了抑制不确定性的目的。但是对于一般的控制问题,特别是在今天的数字控制的环境内,由于系统各个部分的不确定性,包括相位和时间滞后,过高的开环增益会引起系统的不稳定。这时简单的负反馈,PID控制器或者更复杂的控制器都很难同时满足设计要求。

可见控制工程是一个应用学科,要跟客观世界打交道。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、制造的系统不能总是输出我们想要的,这时我们就应当通过适当的控制机制对该系统的输入进行调整,以得到我们想要的输出。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。

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都具有不确定性。在此我们把不确定性对控制系统所造成的影响称为**扰动**,并且分为**内扰**和**外扰**。前者指系统内部动态的变化,后者指来自环境的未知外力。在现有文献中提到的扰动一般指外扰,即独立于系统动态特性而来自于环境的外力;内扰是指系统内发生的变化,通常与其动态特性相关,在现代控制论中被归纳为鲁棒问题。我们则称二者的和为**总扰动**^[12],把它纳入不确定性的范畴。这样,控制问题就可以说是抗扰问题;一个控制器的好坏就在于其抗扰的难易、范围的宽窄、功能的高低。以此标准来衡量,现有控制器设计方法的优缺点就一览无遗。比如工业界常用的PID的

抗扰能力就很有有限,因为它要被动地等到扰动已造成了后果后再对其进行补偿,而不是主动地对扰动进行补偿。

因此,PID虽然简单实用,但是这种“基于误差来消除误差”的控制器的抗扰能力必定是可以提高的,而且其意义深远。试想在一个工业温度控制系统里,加热或制冷不当造成温度误差,消耗过多能源;而通过控制器对误差的纠正又要耗能。可想而知一个能够估计扰动并且在它造成误差之前就将其补偿掉的控制器不仅会提高温控精度,还有可能大幅度节能。一般来说,任何一个输出波动的控制系统都可能浪费大量的能源。因此控制设计的目标是在存在大量不确定性的系统里使其输出快速地跟踪给定值,并且不超调,不浪费能量。这样,“什么是控制?”不仅仅是概念问题、学术问题,更重要的是它还是现实问题、能源问题。

3 怎么抗扰?—控制工程的三个范式

如果控制问题就是抗扰问题,那么“怎么抗扰”就变成了核心问题。控制系统就应该以抗扰的能力为标准加以归纳和衡量。为了叙述的方便,我们借助下述的例子来介绍控制工程的三个范式。

例1:一个运动对象基于牛顿定律可简单地表示为

$$\ddot{y} = p(y, \dot{y}, w, u, t) \quad (2.1)$$

其中: y 为位置输出; u 为控制输入; w 为来自操作环境的外扰。函数 $p(y, \dot{y}, w, u, t)$ 描述系统的动态特性,它本身的不确定性是内扰。对这个对象的控制设计目的不外乎有两种可能:

$$\textcircled{1} \text{改善系统的动态响应} \quad (Q1)$$

$$\textcircled{2} \text{使 } y \text{ 快速地跟踪给定值 } r \quad (Q2)$$

显然,负反馈放大器的成功只是解决以上问题的一个特例,适用于开环大增益的系统,特点是它同时满足了改变动态特性和抗内扰的要求。可是在工业控制中,不光存在大量的不确定性,开环增益也受到很多物理限制。怎样有效地抑制其不确定性,同时满足改善(Q1)或者(Q2)的要求则是工程上有待解决的问题。而解决问题的途径则可以归纳为三类范式:工业范式,模型范式和抗扰范式。

3.1 工业范式

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,常常有很多不确定性,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(2.1)中函数 $p(y, \dot{y}, w, u, t)$ 完全未知的情况下进行的。在控制学发展的前期,工程师们本着实验科学的精神,在实践中发现了不少有效的经验方法,比如负反馈^[5], PID^[6], 和PID参数整定法^[7], 等等。特别是PID法,

$$u = k_p e + k_i \int e + k_d \dot{e}, \quad e = r - y \quad (2.2)$$

至今在工业界仍然占据统治地位,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。由此可见控制技术发展的实验性和经验性。负反馈放大器就是PID的一个特例($r=0, k_p=h, k_i=k_d=0$),解决的是(Q1)的问题,

而且答案是在 $p(y, \dot{y}, w, u, t)$ 未知的情况下发现的。不管是(Q1)还是(Q2)，这么简单的反馈控制怎么能够用来控制一个完全不确定的系统呢？主要原因有二：① 所有扰动最终都会引起 y 的变化。那么负反馈则试图抵消此变化的原因。可以说负反馈有“天生的”抗扰性。② 工程师们在大量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是上个世纪二十年代的技术，比负反馈放大器还早五年，但至今仍在工业界占据统治地位。PID是典型的被动抗扰技术。控制器只能等到扰动作用于系统产生了误差后才能反应，抗扰能力很有限。为了改善PID的控制品质，工程技术人员多年来想出了很多办法。前馈就是个例子。

控制基于反馈是控制理论里一个众所周知的前提^[3]。也就是说控制系统离不开被控对象输出的反馈；不论是PID机制还是现代控制论都不例外。但是在工程实践中我们却发现大多数控制器的输出不仅决定于反馈，还决定于前馈。比如，在一个大型火力发电厂里我们发现，锅炉进煤量的90%是根据发电量的目标值而不是它的测量值决定的。这90%就是前馈；另外10%是根据测量值和目标值的差，通过PID得到的微调。为什么这样设计呢？因为不管是根据经验还是对物理过程的理解，技术人员常常可以比较精确地找到对应于一个给定发电量的进煤量。而控制器的作用则是根据发电量的反馈，在小范围内对进煤量进行调整。类似这样的反馈+前馈的设计在过程控制中很常见。虽然前馈可以有效加快系统的过渡过程，但是在抗扰上它的能力却很有限。这是因为前馈控制在工业中一般只是根据系统已知的开环特性设计的；对未知的扰动就只能靠PID了。

3.2 模型范式

我们再来看抗扰是怎样在现有的控制理论的框架下解决的。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标准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，那么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，在模型范式下要先忽略外扰，对对象建模，找到式(2.1)中 $p(y, \dot{y}, w, u, t)$ 的解析表达式，并把它近似为

$$p(y, \dot{y}, w, u, t) \approx q(y, \dot{y}) + bu \quad (2.3)$$

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

$$\ddot{y} = g(y, \dot{y}) \quad (2.4)$$

那么控制律就可写成

$$u = \frac{-q(y, \dot{y}) + g(y, \dot{y})}{b} \quad (2.5)$$

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(Q1)和(Q2)问题的思路。简称为模型范式。

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。而基于频率法的鲁棒控制这一控制学的分支则应运而生。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。

这样，以负反馈放大器为起点，从上世纪初到现在的近百年时间里，控制科学已渐趋成熟。一方面在工业范式中，以PID为核心，独立于模型，人们做了大量改进，通过各种参数整定算法，利用前馈，大大提高了控制品质。另一方面以模型范式为基础，控制理论的发展交叉于工程和应用数学之间，产生了诸如频域分析法和状态空间等工具，总结扩大了负反馈机制的一般性，使其得以迅速发展工程内外的各个应用领域。

遗憾的是基于经验的PID和基于模型的设计方法互不相容，两个范式之争造成几十年来理论和实践的距离越来越远。从抗扰的角度思考，这可能是因为二者来自截然不同的前提。以式(2.1)为例， $p(y, \dot{y}, w, u, t)$ 在工业范式中被视为完全未知，在模型范式中却要假设为已知。很显然控制工程一个真正有效的范式必然介于二者之间。对于现实世界的控制对象，它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。但是发现控制品质虽然有所提高，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。

3.3 抗扰范式

我们对(2.1)中的 $p(y, \dot{y}, w, u, t)$ 不可能完全知道，也不可能什么都不知道。那么，我们究竟通常知道多少？我们根据对这个问题的回答反思控制设计的前提。

要知道工业控制的对象通常是人工设计、制造的，满足给定的性能要求。因此它输入输出的基本规律是不难知道的。以式(2.1)为例，在机电系统里， 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 \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，我们先要选定扭矩足够大的电机；不考虑摩擦力和外扰，在理想情况下， u 与 \ddot{y} 的比例关系是

$$\ddot{y} = bu \quad (2.6)$$

b 是电机扭矩参数与负载物体质量的商，是知道的。对于这个对象的控制设计很容易，通常用(2.2)中的P和D项就足够了。

但是(2.6)只是(2.1)的一部分。它们的差就是系统的不确定性，即总扰动，表示为

$$f(y, \dot{y}, w, t) = p(y, \dot{y}, w, u, t) - bu \quad (2.7)$$

它是对象的内扰(非线性摩擦力等)和外扰(w)的总和,即总扰动。这时(2.1)可改写成

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) + bu \quad (2.8)$$

那么假如这个总扰动的值可以实时地从已知的输入输出信号中估计出来的, $\hat{f}(t) \approx f(y, \dot{y}, w, t)$, 那么(2.1)就可以通过

$$u = -\frac{\hat{f}(t)}{b} + u_0 \quad (2.9)$$

转化为(2.6)。这里 u_0 是虚拟控制信号,可以用(2.2)的PID来产生。换言之如果式(2.7)中的总扰动可以实时的估计出来,那么(2.1)表示的复杂的控制问题就可以转化成(2.6)这个控制问题的标准型。而总扰动的估计则可采用现代控制论提供的状态观测器,先对式(2.8)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 $\hat{f}(t) \approx f(y, \dot{y}, w, t)$ 就可从适当的状态观测器得到[8-13]。

以上我们用(2.1)的例子来介绍抗扰范式。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(canonical form),例如类似式(2.6)的积分器串联型。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,积分器串联型是通过扰动实时估计、补偿得到的,使控制设计大大的简化。这是因为对标准型的问题总有标准答案,所有模型范式中得到的方法都可以用得上。这是我们再来讨论控制设计前提就会发现它变得很不一样:

① 已知控制对象的标准型,如(2.6) (A1)

② 总扰动,即标准型和控制对象,可以被实时地从对象的输入输出信号中估计出来 (A2)

这样,(A1)回答了控制工程的一个基本问题:我们设计控制器之前需要知道对象的什么信息。而这些信息是我们通常知道的。以式(2.6)为例,在抗扰范式下控制设计的前提是我们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(2.3)为例,如果对象的数学模型已知,控制器按模型范式也已给定,见(2.5)。那么系统的总扰动从(2.7)变为

$$f(y, \dot{y}, w, t) = p(y, \dot{y}, w, u, t) - (q(y, \dot{y}) + bu) \quad (2.10)$$

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(2.5)可修改为

$$u = \frac{-(\hat{f}(t) + q(y, \dot{y})) + g(y, \dot{y})}{b} \quad (2.11)$$

从而实现扰动的补偿。这说明系统的不确定性不论大小,都可以通过抗扰的手段抑制掉了。

由此可见抗扰范式提供了一个新的框架,反映了一个解决实际问题的切实可行的思维方法。我们不用再刨根问底,非要被控系统的准确模型不可。同时也剥去了

PID的朦胧,建立了怎样抗扰的清晰。以上的讨论虽然都从(2.1)的二阶对象谈起,而抗扰方式却远远不限于(2.1)所代表的问题。至于其适用范围的具体描述,读者可参考[12]。

4 自抗扰思辨

以上介绍的三个范式是站在方法论的高度归纳、总结了控制工程的理论与实践。工业范式反映了近百年来,人们在实践中总结出来的有效控制手段,经久不衰;模型范式适合思维严谨的理论工作者,在一个公理系统的框架内,基于给定的数学模型和控制目标,推演反馈控制律;而抗扰范式则显示了对控制问题的不同理解。它源于韩京清先生对上述两范式的反思获得的直觉^[4]。凑巧的是数年后R. Brockett一针见血地指出控制问题的核心所在:“如果没有不确定性就没有反馈的必要”^[4]。自抗扰就是在这样的大气候里产生的,在概念上令人耳目一新,在理论上持续发展,在应用上硕果累累的控制技术。

4.1 源头活水

在文献里自抗扰控制通常是指一类特殊的控制器,又代表一个控制系统设计的独特思路和方法,以及由此产生的一系列控制手段、技术、算法。更重要的是,对于什么是扰动以及怎么抗扰这个控制工程的基本问题,自抗扰给出了一个迥然不同的理解,提供了一个新的平台。它是韩京清先生纵观中外几十年的理论研究和工程实践,以实验科学的精神,对抑制不确定性这个控制工程的核心问题给出的解答。

说起来,自抗扰里“自”这个字怎么理解,怎么翻译成英文还是件有趣的事。作者借95年回国开会之机访问韩京清先生的时候第一次接触他的学术思想,特别是自抗扰的概念。虽然当时理解不深,但是颇有耳目一新的感觉。记得翻译“自”这个字时考虑了两个选择:按“自动”理解是auto-,按“自己”理解是self-。韩先生取了前者,即 Auto-Disturbance Rejection Control,简称ADRC。后来,随着对ADRC观念的理解逐步加深,我们发现auto一词并不十分达意。于是,经与韩先生和黄一教授商量,我们在2001年美国CDC会议上一篇综述论文中首次把auto改为active,给了ADRC一个新的解释^[1],让它的意义在英文里一目了然。特别是这样一来,自抗扰的英文翻译,Active Disturbance Rejection,与一个知名的降噪技术,Active Noise Cancellation,一一对应,异曲同工,使人们很容易接受、理解。用Active替换Auto一词还有个意想不到作用:它画龙点睛般地直指自抗扰的本质。

上面提到,如果说控制问题就是不确定性问题,而不确定性问题就是抗扰问题,那么抗扰就是控制工程的核心。所谓自抗扰就是要自发、主动、直接地,而不是被动、间接地去抑制扰动;就是设法尽早得到扰动信息,在它还没有造成损失之前把它补偿掉。主动抗扰概念的雏形早在十八世纪末、十九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。Poncelet虽

然给出了设计方案，却没能实施。一百多年后，苏联学者Grigoriy Shipanov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。六十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。后来因为种种原因，不变性原理在七十年代后逐渐销声匿迹了。

自抗扰出现于九十年代中。在这之前韩京清先生主持了现代控制论的普及和“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。以他1989年<控制论-模型论还是控制论>一文^[14]为起点，他反思控制科学的范式，重温不变性原理并摆脱其模型范式的局限，后于九十年代中提出了独具一格的自抗扰控制法^[8-10]：一个崭新的理念，基于仿真研究的实验科学方法，以及实用有效的控制算法。这样，一个富于活力的主动抗扰的理念，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。

4.2 主动抗扰与“防患于未然”

自抗扰是针对现有控制技术的不足而进行的新尝试。从式(2.2)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。

相比之下，自抗扰的思想就是不要被动地等，而是要主动从被控对象的输入输出信号中把扰动的信息提炼出来，然后以这个信息为依据，想办法在扰动影响系统之前用控制信号把它消除掉。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。这也是为什么人们在应用中发现自抗扰控制器在稳定性和闭环响应方面有突出的特点。从式(2.9)可见，能够被实时估计出来的扰动在还未影响输出之前就被控制信号抵消了，在相位上比(2.2)的PID超前很多。由此看来，把自抗扰中的“自”翻译为Active(主动)突出了自抗扰思想的特点。而主动优于被动是自抗扰技术正得以发展的原因。在(2.1)的运动控制范例中，时变、不确定和非线性的摩擦力是一种扰动，它的变化比运动物体位置的变化在相位上超前近180度。怎么让位置尽量不受扰动的影响呢？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，这比基于位置误差的PID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，而自抗扰则是要在大量误差出现前就把扰动主动地补偿掉，治的是未病。

直觉告诉我们，与其亡羊补牢，不如防患于未然。在大量实际应用里我们发现主动抗扰的特点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，和震荡或超调幅度的降低。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！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，由于积分项和前馈动作慢，反应滞后，控制器一直要等到(2.2)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一般都需要能量，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，耗能也大大降低的原因所在，见图1。

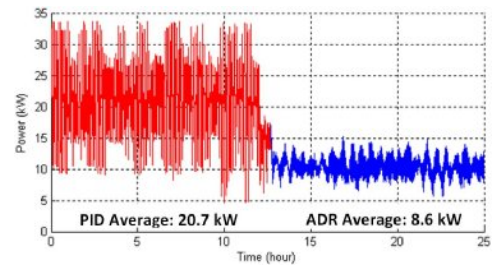


图1 在生产线上PID与自抗扰的功率比较

4.3 自抗扰的自然然而

把自抗扰翻译为主动抗扰突出了它在技术上的特点，使它更容易被人接受。但是主动抗扰并不一定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。而庄子更是在<养生主·庖丁解牛>一文中把自然而然的理想描述的淋漓尽致。百年来控制理论从无到有、蓬勃发展，“为学日益”。而自抗扰则相反，“为道日损”，吸取现代控制论的精华，主要是状态空间法，特别是状态观测器，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，把对象中的其它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，我们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-不确定等人为之分，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被普遍关心的问题，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，而且直观，简易，有效，让人想起古人“守约而施博”的典范。

在工业应用上，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后的第一个评价是“优美”。这是因为自抗扰可以把他们几个不同的技术问题用一个巧妙的算法一下都解决了。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理解: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。它既直观又抽象,既具体又一般,这才使人感到“优美”。

自抗扰的发展历程对我们在研究开发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Shipanov,在理性上升为不变性原理,又通过Petrov,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,抽象出来就是数学问题,“类万物”,也曾被称为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的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,用构造性的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、求解的问题。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。自抗扰体现了我们将对象的“知”,即从工程中建造被控对象的过程得到的知识,和对它进行的控制设计的“行”天衣无缝的相契合。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生根、开花、结果的原因。

结束语

本文做了一个新的尝试,即在自抗扰之外讨论它对控制工程范式的改变及其意义。由于时间仓促,本文还有许多不尽人意之处,有待完善,还请读者见谅,并多多指正。作者的出发点是引起大家对范式这个话题的兴趣,借以展开讨论和对话。尽管自抗扰在过去十年中有很大的发展,越发引起人们对它解决问题的能力关注,但是它与广大工程技术人员和理论工作者的对话才刚刚开始。本文的目的就是给这个对话提供背景和话题。

综上所述,自抗扰是个新颖的控制理念和设计方法,也是一类新型的控制器的。针对不确定性这个控制工程的核心问题,自抗扰代表了一个全新的思路:采用构造性方法,通过对总扰动量的实时估计和及时抵消,使得系统对大范围内的总扰动产生免疫力。由于抓住了主要矛盾,既直观又抽象,自抗扰在解决工程问题时才会令工程人员得心应手、自然而然、事半功倍,也显示了自抗扰巨大的潜力和前景。

本文试图从方法论的角度探讨自抗扰理念的起源、内涵、意义,以及基于此理念的全新范式,即抗扰

范式。目的是使它在概念上更清晰,应用上更灵活。自抗扰的发展绵延不断、几经曲折。重访它的源头活水,反思它的范式和开创性或许能使我们的思路更开阔,更富于创造性。近些年来,自抗扰做为一个行之有效的工程技术在国内外已经得到了广泛的应用,特别是最近出现的在时域和频域的稳定性分析和鲁棒性分析又为这些应用提供了理论依据,也为控制理论的研究开辟了新天地。

鸣谢:在韩京清先生去世两周年之际,作者将本文献给他和他的家人。作者还特别感谢王学军博士对本文提出的宝贵意见,以及郑勤玲同学对文字的校对。

参考文献:

- [1] T. Khun. *The Structure of Scientific Revolutions, 3rd Ed.* Chicago: Univeristy of Chicago Press, 1996.
- [2] Tariq Samad. "What is Control Engineering Anyway?" *IEEE Control System Magazine*, 2009.10:12-13, Oct. 2009.
- [3] O. Mayr, *The Origin of Feedback Control*, The MIT Press, 1970.
- [4] R. Brockett, "New Issues in the Mathematics of Control," *Mathematics, Unlimited - 2001 and Beyond*, B. Engquist and W. Schmid Ed., pp. 189-220.
- [5] H. Black. "Inventing the Feedback Amplifier", *IEEE Spectrum*, 1977.12 14: 54-60.
- [6] N. Minorsky. "Directional Stability and Automatically Steered Bodies", *J. Am. Soc. Nav. Eng.*, 1922,34:
- [7] J.G. Ziegler and N.B. Nichols, "Optimal Settings for Automatic Controllers", *Trans. ASME*, 1942,64: 759-768.
- [8] J. Han. "A Class of Extended State Observers for Uncertain Systems", *Control and Decision*, 1995,10(1) 85-88.
- [9] J. Han. "Auto-Disturbance Rejection Control and its Applications," *Control and Decision*, 1998,13(1).
- [10] J. Han. "Nonlinear Design Methods for Control Systems," *Proc. of the 14th IFAC World Congress*, Beijing, 1999.
- [11] Z. Gao, Y. Huang, and J. Han, "An Alternative Paradigm for Control System Design", *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, 2001.12(4-7),5: 4578 - 4585,
- [12] G. Tian, Zhiqiang Gao, "From Poncellet's Invariance Principle to Active Disturbance Rejection", *In Proceedings of the American Control Conference*, 2009: 2451 - 2457.
- [13] Z. Gao. "Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design," *In Proceedings of the American Control Conference*, 2009: 2399-2405.
- [14] J. Han. "Control Theory: Model Approach or Control Approach." *System Science and Mathematics*, 1989,9(4) 328-335.
- [15] J. Preminger, J. Rootenberg. "Some Considerations Relating to Control Systems Employing the Invariance Principle," *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1964.7,9(3).
- [16] J.-V. Poncellet. *Introduction a la Mecanique Industrielle, Physique ou Experimentale*, 3rd Edition, M. Kretz, Ed. Paris:Gauthier-Villars, 1870.
- [17] J.-V. Poncellet. *Cours de Mecanique Appliquee aux Machines*, 4th Edition, M. Kretz, Ed. Paris:Gauthier-Villars, 1874.
- [18] S. Bennet. *A History of Control Engineering, 1800-1930*, Peter Pergrinus Stevanage: IEE, 1979: