

重读《控制理论--模型论还是控制论》有感

《控制理论--模型论还是控制论》一文（下称本文）写于 1989 年，是韩京清先生学术生涯的缩影，是自抗扰控制的起点。在思维上承上启下，在时间上承前启后，在写作上一气呵成，并给人深刻的启示：控制问题不仅仅是理论问题，技术问题，或是应用问题；它的本质是如何抓住、理解工程的关键问题，找到正确的解决方法。要知道上个世纪八十年代的韩京清已经是国内控制界的领军人物，不光在最优控制，导引理论的概念和方法，线性系统理论等方面成绩累累，还在文革后为中国控制界培养了一批人才，并亲自带领他们研究、开发了中国第一个控制系统计算机辅助设计软件包。正是这么一个令人羡慕的领军人物在他学术生涯的巅峰突然转了 180 度，放弃了轻车熟路的数理方法以及名望和地位，义无反顾走上了自己的路。本文中可以看到自抗扰控制思想的萌芽，但是作者当时肯定并不知道将来会怎么样。他只是有这样一个信念：如果我们的目的是研究工程控制，是发展能够指导实践的理论，而不是堆建高高在上、不切实际的空中楼阁，那么我们就不能沿着现代控制论的轨道走下去！可是为什么呢？为什么一个德高望重的学者把几十年的积累放在一边，重起炉灶，以五十多岁的年纪，像初学者一样学 FORTRAN，编程序？控制研究与编程又有什么关系？答案就在本文的字里行间。

本文首先质疑：现代控制理论究竟研究的是什么？是模型还是控制？控制律的发现和综合是不是一定建立在数学模型之上？从工程实际出发，以导引理论为例，韩京清提出控制问题并不见得一定要有数学模型才能解决，关键是应该用什么样的思维方式来对待、理解控制问题。现代控制论的方法是通过数学建模和对模型的分析，寻找控制的客观规律，建立了诸如可控性、可观性、鲁棒性等基本概念，取得了诸如优化、状态反馈、状态观测器等大量成果。韩京清在文章中对此均给予了充分的肯定。但是，他也提醒我们注意以模型为前提的控制理论在工程上会受到很多限制。若非如此，为什么 PID 在工业界上还是占有垄断地位？为什么鲁棒性问题仍难以彻底解决？为什么在复杂系统中甚至会遇到“模型灾难”？若要回答这些问题，我们需要重新探讨控制的本质问题。下面我对韩京清先生反思控制论的几个关键问题谈谈自己的看法。

“控制”的共性问题

众所周知，钱学森先生是控制界的先驱，他的《工程控制论》为控制学科奠定了基础。1979 年该书再版时他在前言里阐述的一些观点令人深思。首先他提出控制论、相对论和量子力学，是上个世纪上半叶三项重大的科学革命，是人类认识客观世界的三大飞跃。但是相比之下，控制论还不够深入，还不能称其为基础理论，因为它还停留在技术科学的层面上，特性的内容居多，共性的内容不够突出。钱学森主张“集中研究‘控制’的共性问题，从而把控制论提升为一门真正的基础科学”。我认为，控制运用的越广泛、系统越复杂，就越应该去寻找一般规律，寻找特性中的共性，复杂中的简单。从文革前的最优控制，到文

革后的线性系统理论，最后到自抗扰，韩京清的一生都在为追求这一共性问题而不懈地努力。

1979年韩京清在“全国控制理论及其应用学术交流会”上，宣读了一篇题为《线性控制系统的结构与反馈系统计算》的论文，指出不管是线性还是非线性系统，在一定条件下都可以通过反馈转换成线性积分器串联形式，并称之为**反馈系统的基本结构**。它的意义是不管原始系统物理性质是什么，是线性还是非线性，最后都可以通过反馈还原到最简单、最基本、最原始、最理想的形式：即积分器串联型。这是所有反馈系统所共有的性质。而韩京清在线性、非线性和自抗扰等领域的工作都和积分器串联型有关，并以其为基础，所以在这里，我个人认为不妨称之为**反馈系统的标准型**，或简称为**韩氏型**。而根据此形式设计控制器不仅简单方便，而且方法众多，如极点配置，LQ，解耦，动态输出反馈等。这一设计也充分地体现了韩京清一贯的工作特点：简单有效、富于美感。正如2006年，罗克韦尔一位资深运动控制专家在我们的ADRC项目汇报会后高度评价道：“我从来没有想到在高校能够看到这么优美（elegant）的设计。”

这样，反馈控制的设计可以分两步走：1）通过反馈把系统变换为韩氏型；2）根据此标准型和设计要求选择控制律的形式和参数。众所周知，现代控制论通过建模和对模型的分析，寻找控制系统的一般规律，产生了大量成果。然而客观世界中的被控对象，其动态特性、复杂程度以及设计要求是千变万化的，再加上控制理论和方法是复杂多样的，因此解决方案的选择和考虑几乎是无穷无尽的。控制论作为一门基础科学，正是要在这些千变万化与无穷无尽之中找到一定之规。但是知易行难，怎样抓住这一定之规呢？前人不是没有尝试过。线性系统理论中定义了很多标准型：可控型、可观型，Jordan标准型，横山标准型，等等。但它们都只适用于开环系统。韩京清的独到之处在于他抓住了反馈系统的共性：既然目的是通过反馈控制输出和状态变量，不妨先把闭环系统先变换为韩氏型，再根据具体系统的设计要求选择控制律和参数，使控制律的设计标准化。

韩氏型描述的是一个理想被控对象。它摆脱了繁琐的细节；大大简化了控制律的设计；反映了反馈系统的基本结构，特别是反映了控制信号与各个状态变量之间的关系。而且，动态系统的特性反映于积分器之间的参数关系，并在转换成韩氏型后隐藏在状态变换矩阵和状态反馈矩阵之中，使控制律的设计简单化、标准化。根据韩氏型设计的控制器，可以通过这些特定的参数关系做进一步的状态变换，从而成为具体问题的特解，完成了从共性到特性有效过渡。因此，如果说控制论是基础学科，那么韩氏型是不是基础的基础？

“控制”问题的实质

韩京清此后的工作，特别是自抗扰控制的基本结构都与韩氏型密切相关。它所代表的基本结构不仅给控制器的设计带来了便利，更**揭示了控制问题的实质**。现以一阶系统为例：设对象的输入为 u 、输出为 y ，则其韩氏型为 $\dot{y} = -y$ 。控制系统的设计以 y 跟踪参考输入 r 为目的，即 $e \rightarrow 0$, $e = r - y$ 。怎么实现这一目的呢？早在18世纪，瓦特蒸汽机便开始使用飞锤控制器。其控制律可以表述为 $u = k_p e$ ，目的是使蒸汽机转速的变化率与转速差（ e ）

成正比，即 $\dot{e} \propto e$ ，使 $e \rightarrow 0$ 。可见，反馈控制的精华是：你要控制什么，就让它的变化率与跟踪误差成正比！这就是瓦特带来的引发工业革命的一大发明。韩京清把这个从工程实际中总结出的控制规律称之为“根据误差而消除误差”。这说明什么呢？用韩氏型可以很容易看到，控制系统设计的基本问题是怎样把握被控量的导数。而韩氏型所建立的就是控制量与此导数的直接关系，从而使控制律的设计变得简单、易行。

从韩氏型还可看到反馈其实只是实现控制的手段之一。除此以外还有其他途径。比如，若令 $u = \dot{r}$ ，则 $\dot{y} = \dot{r}$ ，那么，在 y 与 r 初值相等的条件下，不仅可达到理想的控制效果（即 $y = r$ ），而且还不需要反馈（传感器），避免反馈带来的负面效应（如闭环系统的不稳定，测量噪声的引入，等等）。可见不管是开环还是闭环，改造的都是 \dot{y} 。因此我们是不是可以说：控制都是通过改变被控量的导数实现的，**控制好被控量的关键在于知道怎样改变它的导数**。我们是不是还可以说，**控制不仅仅是反馈。控制是怎样调控被控量导数的科学和技艺**。不管是反馈还是前馈，都是工程师的发明创造，最初都是技艺。而理论和技术则是在后期日渐成熟起来的。控制的基本手段除了让 \dot{y} 等于或者接近于 \dot{r} （也称为前馈或开环控制），或者让 \dot{y} 与误差成正比（即反馈控制），还有一个工程上更好的选择，即二者的结合， $u = \dot{r} + k e$ ，也称为复合控制。

通过以上的讨论，可以看出韩氏型可以很方便地推广到二阶或高阶系统中去。而问题的关键在于重建控制信号与被控状态导数之间的关系。这反映了控制的基本原理，是不同控制系统中的共性，也是它们的实质。

走出模型论

以韩氏型作为反馈系统的基本结构是对反馈系统改变动态能力的高度概括。以本文为代表，1989年是韩京清学术生涯的分水岭。他的前半生，以现代控制论为框架，在最优控制，导引理论，和线性系统理论等领域均做出了卓越的贡献。特别是在文革后，他在现代控制论的普及，控制系统计算机辅助设计软件的开发和研究，和人才培养等方面都发挥了极大的作用，成为国内控制界的领军人物。但他并不以此为满足，他是一个真正的学者，决不会盲目地跟着别人跑。就在他掌握了现代控制论的精华后，很快就发现了它存在的问题。问题其实早就有了，中国控制界的老前辈们也早就意识到了。

宋健先生 1979 年在《工程控制论》的前言里说：“一种理论是否正确，是否有生命力，是否值得深刻地去研究它，不仅要看它的推理是否正确，或者说从形式逻辑上看它是否成立，更重要的是看它的前提是否正确，命题本身是否反映了工程实践中的客观需要，是否抓住了主要矛盾”。

韩京清深刻思考的正是现代控制论的前提和命题。他认为以模型为前提，“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）”的思想和方法论并没有反映出工程实践中的客观需要，没有抓住不确定性这一工程控制的主要矛盾。他还指出“调节理论和导引理论建立控制律并不完全依靠系统的数学模型”，这种“根据系统对信号的

某些响应特征或过程的某些实时信息来确定控制好一个过程的控制律，是与靠系统的数学模型去找控制律的方法完全不同的思考方式”，并称其为“控制论”。

要知道，自然科学研究的是物质运动的规律。研究者要置身其外，以求客观。总的来说，自然科学里研究的动态系统一般是“封闭”的，没有输入的。典型的研究方法是先建立数学模型，再对它进行分析。类似的是，在现代控制论发展的初期，通过对系统的建模和分析，人们建立了像能控性和能观性等基本概念以及状态反馈和状态观测器等基本手段。不可否认，这种研究方式曾经起到过积极的作用。

但是控制工程所关心的系统是开放的，有输入的。研究的目的是通过对输入信号的选取对系统进行有效的干预。由此可见，控制科学与自然科学的不同之处在于它的最终目的不仅是通过模型来认识世界，而是要借用人为了的手段改造世界。因此，韩京清认为对于系统的线性和非线性特性在控制论里不应该分开研究。因为在控制系统里，要做的不是通过数学模型对系统进行全局的控制，而是在一个具体的“随时间变化的过程”，根据能获取的随时间变化的信息（比如 $a(t)=f(x_1, x_2)$ ），“控制好一个过程”。他还说：“这种思考方式，相对于模型论方法，可以称为控制理论中的‘控制论’方法”。沿着这个思路再往前走一步，就是自抗扰控制！

自抗扰：“控制论”的又一次飞跃

韩京清一直很关心抗扰问题。1989年以前，前苏联学者把抗扰问题称为不变性问题（即输出在扰动下不变），在线性系统理论里建立了很严格但不实用的条件。与此相比，本文呈现出了一个思维上的飞跃。以二阶动态系统为例， $\ddot{y} + a_1\dot{y} + a_2y = b_1\dot{u} + b_2u + f(y, \dot{y})$ 。在工程上， $f(y, \dot{y})$ （简称 f ）的特点是非线性、时变、不确定的；它其中含有执行机构常有的非线性，比如电机中的磁滞。韩京清在文中第一次提出把 f 当作一个信号来估计而不去追求它的数学表达式，这是一个理念的飞跃。它彻底改变了看问题的角度，同时也提出了一个全新的扰动概念。过去的扰动概念仅指从系统外部环境中的未知摄动，而韩京清对“扰动”这个词做了重新定义，使其既包括原来意义上的外扰，更重要的是它还包括了系统的未知动态和它的变化，即内扰。为了避免误解，他还把内扰和外扰的和（即 f ）称之为总扰动。

这样，一个理想的无扰动系统就可以用韩氏型 $\ddot{y} + a_1\dot{y} + a_2y = b_1\dot{u} + b_2u$ 来表示，它对应的控制器是 PD，即 $u = k_p e + k_D \dot{e}$ ，可使 $e \rightarrow 0$ ，是前面一阶形式的简单推广。现把 PD 放回原系统得 $\ddot{y} + a_1\dot{y} + a_2y = b_1\dot{u} + b_2u + f(y, \dot{y})$ ，即使 f 未知，本文指出 PD 本身的“鲁棒性和适应性很强”，只是有些静差。静差可表示为 $e_{ss} = -f_{ss} / k_p$ ， $f_{ss} = f|_{t \rightarrow \infty}$ 。为了消除静差，工业上常常采用的是 PID 控制律： $u = k_p e + k_D \dot{e} + k_I \int e dt$ 。用 PID 替代 PD，在稳态可知其积分项为扰动 f 稳态值的估计：即 $f_{ss} = (-k_I \int e dt)|_{t \rightarrow \infty}$ 。这说明积分器的作用是在稳态估计扰动 f 。它的缺点是由于其相位滞后，在瞬态影响控制效果，甚至造成系统的不稳定。

这样，问题就不言而喻了：要克服 PID 的缺陷，为什么不全程地估计、补偿 f 呢？如果 f 被补偿掉了，PID 中的积分器不就可以不用了吗？

自抗扰控制（ADRC）正是回答了所有的这些问题。可以说，韩京清创立 ADRC 是自然而然的。本文已提到如果 f 是知道的，就把它从 u 中减去。还提到 f 是可以估计的。这已非常接近 ADRC 的控制律了：即通过对总扰动的估计，实时得到它的近似值 $\hat{f} \approx f$ ；然后通过控制律 $u = -\hat{f} + u_0$ ，把被控系统变换为韩氏型： $\ddot{y} = u_0$ ，再对它加以控制，比如 $u_0 = k_p e + k_D \dot{e}$ 。

因此，本文可以说是揭示自抗扰控制思想的第一篇文章。它清晰地给出了从 PID 思想到 ADRC 思想的过渡。而 PID 与 ADRC 联系和区别在此也一目了然：前者利用积分项给系统升阶，估计补偿了稳态的 f ；后者克服了前者积分器的弱点，对 f 进行全程估计和补偿。至于 f 作为以状态的函数，如何被当成信号加以估计这一具体问题，则是在六年以后扩张状态观测器（ESO）出现时才彻底解决。

本文还提到用非线性滤波器对参考输入 r 进行滤波并求微分，即跟踪微分器，以及在控制器中合理使用非线性。可以看出，自抗扰控制中的主要思想在这里都已初现雏形了。这就是我们上面为什么说这篇 1989 年的文章既是分水岭又是重要过渡：它继承了 1979 年《线》文提出的反馈系统的基本结构，即韩氏型，又为后来自抗扰的创建和发展开辟了新天地。

最后，从工业技术的角度，我们可以再进一步探讨一下 ADRC 与 PID 的相似与不同之处。众所周知，PID 垄断工业界至今已逾百年，可以说是人类技术史的奇迹。我认为这主要是因为通用工业控制器有几个基本要求：1）结构简单，2）适用面广，3）不依赖于模型，4）控制效果好，5）鲁棒性强，6）调试容易。在这几点中，PID 的优良特性突出表现在前三点，而这些在工程上都是必要条件。在这三项要求上，ADRC 与 PID 不相伯仲；但在后三点上，PID 则存在很大的改进余地。一个控制器要想取代 PID，至少在前三点要与它持平，在后三点要大大地超越它。

那么怎么才能进行公平的比较呢？以往主要是通过仿真或是实验做比较研究加以验证。而在这里我们借用反馈系统的韩氏型使 ADRC 与 PID 的根本区别一目了然：即主动地、全程地估计、补偿不确定性 f 。因此，ADRC 的控制效果好和鲁棒性强就不足为奇了。那么最后就只剩下要求 6）“调试容易”了。从 1997 年 ADRC 运动实验成功到 2003 年 LADRC 的参数化，我们在克利夫兰州立大学先进控制中心花了六年时间（期间韩京清两次前来指导）终于找到了一条 ADRC 工业化的途径：把 ADRC 的所有参数都变为带宽的函数。使 ADRC 的调带宽与 PID 的调参相比要更加直观、更加容易的多。这样，工业控制器的最后一个要求（调试容易）就满足了。在大家的不懈努力之下，ADRC 日臻成熟，并逐渐地全面满足工业控制器的各项基本要求。我们希望在不久的将来看到 ADRC 在工业上的普及，就像韩京清先生在他的最后一篇文章中期待的那样。

高志强，2013 年四月二日