

自抗扰控制的传承与发展

(Control Theory and Technology 英文自抗扰控制专刊导读)

高志强

(克利夫兰州立大学, 俄亥俄州克利夫兰市 44115 美国)

引用格式: 高志强. 自抗扰控制的传承与发展. 控制理论与应用, 2023, 40(3): 593 – 595

DOI: 10.7641/CTA.2023.21112

Citation: GAO Zhiqiang. ADRC: the deep roots and the latest developments. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(3): 593 – 595

从思想的传承到技术的落地

自抗扰控制思想起源于钱学森创立的工程控制论^[1], 得益于关肇直对现代控制理论的反思^[2], 成就于韩京清对模型论的质疑^[3]. 在三位先驱创建的工程控制体系(简称钱关韩体系)中, 自抗扰控制技术的诞生与发展势在必行, 其本质是在复杂、多变的物理过程中, 通过建立系统输入输出之间的串级、循环因果关系, 使被控量在系统内外种种不确定因素的影响下保持不变. 钱关韩体系与欧美基于精准数学模型的控制理论体系(简称欧美体系)截然不同, 它注重的是利用数学工具抽象地提炼工程控制的本质问题, 而不是纯数学意义的寻优和稳定. 它基于工程实践和现代计算技术, 以实验科学的方式探索工程控制的基本原理, 建立基本概念, 从而起到指导工程实践、引领技术发展的作用. 钱关韩体系在二战后诞生, 在控制理论与工程实践的交叉中成长.

韩京清1989年“控制论还是模型论”之问^[3]至今振聋发聩, 让人不禁自问: 控制理论到底研究什么? 是物理过程还是数学模型? 他不但勇敢地地质疑欧美体系的底层逻辑, 更是另辟蹊径, 以实验科学精神, 借助计算机仿真, 开创工控技术新篇章. 特别是他把系统中各种不确定性对被控量的整体影响归纳为“标准型”下的“总扰动”, 定义为“扩张状态”, 然后借用扩张状态观测器对它进行估计、相消, 由此巧妙地绕过了详细的数学建模^[4-6]. 总扰动和状态扩张是理念性的突破, 当时令人费解, 现在已被普遍接受.

然而要真正改变工控技术停滞不前的局面^[7], 要在工业界落地, 任何新兴控制技术都需要与工程师所熟悉的PID、频域法语言兼容^[8]. 自抗扰控制的PID近似不仅实现了这个兼容, 而且揭示了PID的隐性抗扰机理, 并使著名的Z-N调参法^[9]能够被使用者“用他们自己的带宽和相位特性语言”所理解^[10]. 此外自抗扰控制更是突破了PID的限制, 成为控制多入多出、高阶、非线性等类型对象的有效手段, 同时又保持了结构简单、参数意义直观、鲁棒性强等特点^[11].

“凡是过往, 皆为序章”. 读者在刚出版的CTT自抗扰控制专刊可以看到, 自抗扰控制的工程化才刚刚开始, 钱关韩体系的拓展方兴未艾. 下面我们做个简单介绍.

走向工程控制的知行合一

自抗扰控制从学术到技术, 从认识到实践, 在与现实世界的碰撞中成长.

面对自抗扰控制带来的性能改进工程师们经常会问: 世上没有免费的午餐, 这个性能提高的代价是什么? 是不是相位裕量? 钟声等在“自抗扰控制相位裕量的定量分析”一文^[12]中系统地回答了这个问题: 针对典型的二阶对象和四种扩张状态观测器, 严格的数学分析、仿真和实验验证都表明, 自抗扰控制的相位裕度是有保证的. 可是这又引出另外一个问题: 这个相位裕度能否进一步提高? 如何提高? 代价是什么? 赵玉涛等在“多个相互竞争的设计指标下自抗扰控制器调参的定量分析”一文^[13]中建立了自抗扰控制器的参数与稳

定裕度、跟踪质量、抗扰性能和噪声抑制等设计指标之间的定量关系,为工程师调参提供了理论依据.由此可见钱关韩体系对工程控制论的定位:数学分析需服务于工程需要.只有严格地建立了控制器参数与设计指标之间的定量关系,控制器的参数整定才能从经验走向科学.

针对自抗扰控制的PID近似人们可能会有疑惑:既然PID有抗扰能力,那么还需要自抗扰控制吗?聂卓赟等在“无模型自适应抗扰比例-积分-微分控制”一文^[14]中,巧妙地在标准PID形式中实现了自抗扰和参数自适应的集成,形成一类无模型自适应控制.这一方法既扩展了控制器的操作范围和抗干扰能力,又保持PID的基本形式和直观性.另外,尽管PID作为一个通用的控制器形式至今在工业界仍然占据主导地位,它的微分项仍然是个众所周知的瓶颈口.为此李向阳等在“关于一种基于移动窗口中迭代学习的新型跟踪微分器设计”一文^[15]中,结合迭代学习改进线性跟踪微分器的功能,以更小的噪声灵敏度获得更高的微分质量,为进一步改进PID的微分项提供了思路.

当控制器的选择从PID的单枪匹马变为自抗扰控制的千变万化,工程师们怎么针对具体问题合理筛选设计方案就成为一个重要问题.为此波兰学者马睿发等在“输出和误差形式的自抗扰控制:联系,等效性与性能”一文^[16]中,讨论了两种自抗扰控制结构的特点和它们之间的关系,进一步揭示了误差型自抗扰控制的特点和实用性.德国学者Herbst等在“离散时间自抗扰控制的调参与实现”一文^[17]中则给出了误差型自抗扰控制从连续到离散的直接转换方式和选项,使控制算法的实现和编程更加简单、实用.自抗扰控制的工程化不断地为工程控制论的研究提供具有现实意义的挑战,这也是对人才培养和知识结构的挑战.

从自抗扰控制的实践到工程控制论的认识

自抗扰控制的研究在理论和实践中交叉并进,兼收并蓄.陈劲峰等在“关于扩张状态观测器几何解释的初步研究”一文^[18]中,尝试结合线性系统理论的几何方法,推敲扩张状态观测器估计总扰动的可行性和设计前提,即所谓“未知状态未知输入完全可重建”.其后续工作是一方面借力打力,在庞大、浩瀚的现代理论体系中寻找成熟、可用的工具,比如文章中的几何方法,目的是在控制论与模型论的结合处构建自抗扰控制的理论基础;另一方面是在模型论中系统地引入自抗扰理念,放宽其对精准模型的依赖,让它更接近于实际.

自抗扰控制反过来也在不断地推动钱关韩体系中基本概念的建立.金辉宇等在“论自抗扰控制中的标准态,局部性和运行稳定”一文^[19]中,针对动态系统的原生态,即储能与记忆单元的理想串联形态,提出了标准态(normality)的概念.以描述物理过程的传递函数为例,其幅频特性在低频段不管多么复杂和变化无穷,在高频都呈现这个原生态.而扩张状态观测器的作用就是把对象的幅频特性在低频段也实时地还原为标准态,这其中的意义不言而喻.

所谓局部性(locality),主要是区别于“对象数学模型所代表的全局性质”,源于“控制器的作用是在物理系统的运行中,根据它的局部特性,控制好一个“随时间变化的过程”^[3].而这个局部特性既可以是时域的也可以是频域的.关肇直用频域语言精准地概括了反馈系统的第一原理:即“闭环系统过渡响应主要由Bode图在跨越频率 ω_c 附近的特性所决定.”^[2]而这个 ω_c 正是系统开环频率响应从低频段到高频段的转折点,它和对象的增益(b_0)一起,构成对象动态在频域的局部性.根据这个关键特性设计的自抗扰控制器,其开环频率响应近乎理想^[19],对象低频段中各种内扰和外扰的出现和变化对 ω_c 和相位裕度几乎没有影响,从而实现了钱学森说的闭环系统的稳定运行(operational stability)^[1],使它在内扰、外扰的共同作用下保持性能不变.这不正是控制系统设计的终极目标吗?

总之,自抗扰控制结合古典控制论的频域法和现代控制理论的状态空间法^[2],根据被控对象频域响应转折点的“局部性”动态信息,通过扩张状态观测器实时地观测、消除总扰动,把被控对象还原为“标准态”,使控制系统的开环频率响应“在跨越频率 ω_c 附近的特性”^[2]保持不变,实现了系统的“运行稳定”^[1].可见,舍弃复杂(交给扩张状态观测器),抓住关键(积分链的阶数和 b_0),聚焦本质(系统的运行稳定),是钱关韩体系的控制论与欧美体系的模型论之间的主要区别.

结束语

自抗扰控制与工程控制论的发展不仅在技术和理论上方兴未艾,也意味工程教学的改革势在必行. 钱学森把工程控制论定位于工程科学^[1]. 他认为工程科学与物理学的主要区别在于前者追求“实际问题的近似解”,后者寻找“过度简化问题的精确解”,因此“物理学家对工程问题不感兴趣”^[20]. 用物理学和应用数学的范式界定工程控制也许是模型论产生的根源. 如何在控制理论的教学从欧美体系过渡到钱关韩体系是我们共同面临的挑战.

2023自抗扰控制研讨会计划于2023年8月26–27日在古城西安举行,具体细节另行通知. 欢迎大家踊跃参加.

参考文献:

- [1] QIAN X (TSIEN H S). *Engineering Cybernetics*. New York: McGraw Hill, 1954.
- [2] GUAN Zhao-Zhi. Some problems in modern control theory (I). *Acta Automatica Sinica*, 1980, 6(1): 49 – 56.
(关肇直. 现代控制理论中的某些问题(I). 自动化学报, 1980, 6(1): 49 – 56.)
- [3] HAN J. Control theory, is it a model analysis approach or a direct control approach? *Journal of Systems Science and Mathematical Sciences*, 1989, 9(4): 328 – 336.
(韩京清. 控制理论–模型论还是控制论. 系统科学与数学, 1989, 9(4): 328 – 336.)
- [4] HAN J. The “extended state observer” of a class of uncertain systems. *Control and Decision*, 1995, 10(1): 85 – 88.
(韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器. 控制与决策, 1995, 10(1): 85 – 88.)
- [5] HAN J. Auto disturbances rejection controller and its applications. *Control and Decision*, 1998, 13(1): 19 – 23.
(韩京清. 自抗扰控制器及其应用. 控制与决策, 1998, 13(1): 19 – 23.)
- [6] HAN J. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900 – 906. DOI: 10.1109/TIE.2008.2011621.
- [7] SAMAD T. A survey on industry impact and challenges thereof [technical activities]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2017, 37(1): 17 – 18. DOI: 10.1109/MCS.2016.2621438.
- [8] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning. *Proceedings of the American Control Conference*. New York: IEEE, 2003: 4989 – 4996. DOI: 10.1109/ACC.2003.1242516.
- [9] ZIEGLER J G, NICHOLS N B. Optimum setting for automatic controllers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1993, 115(2B): 220 – 222.
- [10] NIE Z, LI Z, WANG Q, et al. A unifying Ziegler-Nichols tuning method based on active disturbance rejection. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2022, 32(18): 9525 – 9541. DOI: 10.1002/rnc.5848.
- [11] GAO Z. Active disturbance rejection control: From an enduring idea to an emerging technology. *Proceedings of the 10th International Workshop on Robot Motion and Control (RoMoCo)*. New York: IEEE, 2015: 269 – 282. DOI: 10.1109/RoMoCo.2015.7219747.
- [12] ZHONG S, HUANG Y. Quantitative analysis on the phase margin of ADRC. *Control Theory and Technology*, 2023, 21(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11768-023-00128-z>.
- [13] ZHAO Y, HUANG Y, GAO Z. On tuning of ADRC with competing design indices: a quantitative study. *Control Theory and Technology*, 2023, 21(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11768-023-00136-z>.
- [14] NIE Z, LI G, YAN L, et al. On disturbance rejection proportional-integral-differential control with model-free adaptation. *Control Theory and Technology*, 2023, 21(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11768-022-00125-8>.
- [15] LI X, MADONSKI R, GAO Z, et al. On a novel tracking differentiator design based on iterative learning in a moving window. *Control Theory and Technology*, 2023, 21(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11768-023-00132-3>.
- [16] MADONSKI R, HERBST G, STANKOVIC M. ADRC in output and error form: connection, equivalence, performance. *Control Theory and Technology*, 2023, 21(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11768-023-00129-y>.
- [17] HERBST G, MADONSKI R. Tuning and implementation variants of discrete-time ADRC. *Control Theory and Technology*, 2023, 21(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11768-023-00127-0>.
- [18] CHEN J, GAO Z. On geometric interpretation of extended state observer: a preliminary study. *Control Theory and Technology*, 2023, 21(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11768-023-00130-5>.
- [19] JIN H, GAO Z. On the notions of normality, locality, and operational stability in ADRC. *Control Theory and Technology*, 2023, 21(1). DOI: <https://doi.org/10.1007/s11768-023-00131-4>.
- [20] Tsien H S. Engineering and engineering science. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 1948, 6: 1 – 14.