

## 跟着韩老师做自抗扰

黄一 中国科学院数学与系统科学研究院

黄雨馨记者受高志强委托整理收集韩京清老师材料，希望我能回顾一下从1995年到系统所做博士后一直到2008年韩老师去世这段时间和韩老师一起进行自抗扰控制应用研究的一些过往，我理解记者的口味，是希望具体有细节和情节的内容，而不是泛泛的模式化的东西，往事尘封已久，我请她容我慢慢回想一下……

第一次听说韩老师的新思想大概是1992年左右，那时自抗扰控制（ADRC）还没有完全成形，是关于非线性系统控制的一个独特的设计思想。当时非线性控制很热，韩老师却独辟蹊径——就是后来我在文章 [1] 里介绍的直接反馈线性化方法，好像还在那年的控制年会上争取了一次非正式的大会报告，但并未引起大家的关注。我那时还是东南大学的博士研究生，听了报告觉得很惊讶，为韩老师这么直截了当而简洁的想法而震惊，有点要捅破天的感觉，那么困难的非线性系统控制问题如果这么容易就解决了，那么那些各种各样的高深的非线性系统控制理论和方法还要研究吗？我当时感觉这个疑问对我一个博士生来说太大了，大到不太能判断也想不太明白，当时还就韩老师的这一思想请教过一些人，但都不置可否。

1995—1997年，我回到系统所，在韩老师指导下做博士后。当时ADRC的算法已经基本形成，韩老师非常迫切地想推广，一方面在学术界宣讲，但那时还不太被学术界接受，同时，韩老师就自己想办法做实验，期望用事实说话。韩老师接受我做博士后的一个更重要目的其实是希望周力军过来协助加强ADRC的硬件实现，当时他有个硕士生丁曙初正在自己动手搭电路做控制器硬件，来实现炉温的自抗扰控制<sup>[2]</sup>。周力军以合同聘用方式跟着韩老师工作了一年多，期间毕大川所在的中国创新技术公司在做磁悬浮列车可行性试验（毕大川早年曾在控制室工作过，与韩老师熟识），就让周力军去做磁悬浮的自抗扰控制试验，试验做出来了，大家都特别高兴，挺兴奋的，与同时在做试验的另一种控制方法相比，ADRC的控制效



果要明显地好，磁块浮起来后，可以往上面扔砖头（模拟加扰动），磁块依然可以浮在设定的高度，还可以根据扩张状态观测器 (ESO) 估计出的负载变化自动实时调节让磁块悬浮在最优位置上，以实现控制能耗最小<sup>[3,4]</sup>。但公司出于一些可能商业层面的考虑，这个工作并没有太公开。

我真正跟着韩老师开始 ADRC 的应用研究是 1999 年承担航天 A 项目的一个 ADRC 飞行控制项目（从 1999 到 2008，我和韩老师一起先后在不同单位根据不同飞行控制要求一共做了 4 轮 ADRC 飞行控制项目，下面用 A\B\C\D 指代），那是 ADRC 在飞行控制应用研究的第一个工作，也是我的第一个应用研究课题。其实我当时是迫切地想做应用，从硕士到博士学了听了那么多理论，就特别想做应用，就想看看实际问题到底是怎样的，各式各样的理论是骡子是马拉出来遛遛。能拿到这个课题是因为许可康老师曾经在航天部门工作过，和那里的人熟，对飞行器动力学模型也熟悉，就主动和他们联系，韩老师、许老师就这个项目去谈过好几次，谈成后我们都挺高兴的，还一起吃饭时庆祝了一下，我跟韩老师说“您就尽管去接应用课题，接什么我们都做”。我性格内向，比较“社恐”，后来做的一系列课题，都是韩老师和许老师出去找合作，我跟在后面具体做课题。这个课题让我对实际的不确定系统以及工程系统的控制要求有了切身体会，也是通过这个课题我感觉 ADRC 是个实现复杂非线性不确定系统高速高精控制的有效方法。因为，飞行器控制是多输入多输出的，因

此非线性耦合特性很典型，气动参数不确定性又很大，控制性能上又要求快速高精度，所以 ADRC 控制多变量非线性不确定系统的优点都可以充分体现。那是我接受 ADRC 的开始，仿真效果出乎意料的好，甲方加大难度，提出了一些超出任务书难度的场景，ADRC 依然能很好地工作。但甲方最后还是搁置了这个方案，我们后来还做了好几个项目，都是这个结局，韩老师、许老师还有点不忿，说他们太保守了，不敢尝试新东西。不过其实我一直还挺理解工程单位的保守（谨慎）的，每当甲方提出更高更严苛的指标时，我还挺高兴的，至少表示人家愿意更全面更深入地验证它。而且对一个新方法，这样做也是应该的，还挺乐意去做的。知道方案被搁置后，我就写了文章<sup>[5]</sup>，投了 2000 年的亚洲控制会议，想着我要留个记录，记载我们曾做过这件事。这是第一篇 ADRC 飞行控制的文章，但可能几乎没人读过，连我自己都快忘了。后来我在这篇的基础上又写了一篇文章投了 2001 年 CDC 会议<sup>[6]</sup>，还是希望能将这个工作记载下来，但其实读过这篇文章的人也很少，不过至少现在在网上还能搜到。2001 年我在



日本访问,无法去参加 CDC 宣读论文,要特别感谢高志强,爽快地答应帮我去宣读这篇文章。前几年,他才告诉我,其实当时整个会场,从宣读者到听众,都是一脸懵,完全不明白文章在干什么。

那时 ADRC 在学术界还是有很大争议,因为它的所谓稳定性证明还没有做出来。有一天,韩老师让我写一篇介绍自抗扰控制的文章,投给《控制理论与应用》杂志,就是 2002 年发表的论文 [1],我当时猜测韩老师让我写而不自己写应该是为了避免争议吧。后来,论文的审稿确实遇到不同意见,听说是当时期刊的主编亲自拍板才录用的。

但我当时对这个并不太在意,还是想做实际问题,摸到实际问题才觉得心里踏实,先后还做了:

- 1999—2000 年,承担了中国科学院北京天文台国家天文观测中心大射电望远镜 (FAST) 预研究项目课题“Stewart 平台精定位控制方案设计”,韩老师和 FAST 项目的首席南仁东是老乡,两人好像挺对脾气的。开会讨论时,我们的 ADRC 方案报告 [7] 还得到了南仁东先生的称赞。后来我出国访问一年,就没有再跟进了,听说韩老师还曾去西安进行了有关 Stewart 平台的 ADRC 控制试验。

- 2002—2003 年,我们申请到了中国科学院科技创新基金“自抗扰控制技术在高速高精度控制上的应用”,这个课题是在韩老师许老师鼓励下申请的,因为对负责人的年纪有限制要求,韩老师和许老师让我做了负责人,其实都是韩老师

和许老师在后面推着,找应用单位都是韩老师和许老师带着我去的,应用合作单位是航天 13 所和某工程学院,以及航天的另一个所,在这个课题的支持下主要进行了两项工作:

- (1) 动力调谐陀螺自抗扰控制实验研究<sup>[8]</sup>。

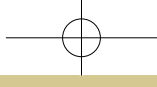
- (2) 火控系统快速跟踪与精确瞄准的自抗扰控制。

2002 年冬与韩老师、许老师、武利强在某工程学院进行 ADRC 火控系统试验,去了好几次。试验都是在户外进行,正是冬天,北京郊区的户外挺冷的,有次试验还下起了雪,韩老师和我们一起裹着军用棉大衣在高的试验车上爬上爬下做火控系统试验。

- 2002—2003 年,进行了航天 B 项目委托的抗高空风干扰的飞行自抗扰控制方法研究,做这个问题也是韩老师联系的,对方联系人是韩老师的老乡,接到委托书还没有签合同我们就开始做了,我们根据对方提出的问题要求提交了 ADRC 控制的技术报告,但后来因为对方单位一些非技术层面的原因,并未签合同进行下去。

- 2004—2007 年,承担了航天 C 项目的有关飞行控制课题,完成了飞行自抗扰控制的半实物仿真试验。听说这个项目的起因是韩老师参加一次中国科学院与航天科工集团的科研对接交流会时,遇到在航天工作的李老师。上世纪七十年代到八十年代初,控制室曾经到航天部门大力宣讲过现代控制理论<sup>1</sup>,韩老师曾在七机部二院图书

<sup>1</sup> 20世纪60年代初,在钱学森的倡导下,在关肇直的努力下,经中国科学院和国防部第五研究院商定,于1962年3月在中国科学院数学研究所成立控制理论研究室(简称“控制室”),关肇直任研究室首任主任,宋健任副主任,韩京清是控制室最早的成员之一。控制室成立之初的目的很明确,就是发展现代控制理论,并为研制我国的航天航空技术服务。在关肇直和宋健带领下,全室人员一边学习导弹基本原理,一边学习当时新兴起的现代控制理论,并与航天部门的科研人员一起承担了许多重大项目。二十世纪七十年代以后,全室人员为在中国推广普及现代控制理论做了大量工作,到航空航天的研究机构了解实际问题,给这些单位的科技设计人员开办讲习班,系统讲授现代控制理论基本理论和常用的设计原理和方法。因此,老一辈控制室人都有很强的为国家航天事业服务的使命感,这点挺打动我的。后来我还承担过航天一些不同单位的课题,那里的老航天人只要一听我是系统所控制室的,都对我特别好,常常情不自禁地和我回忆当年和控制室的老一辈一起学习工作的情景,让我颇有点前人栽树后人乘凉的感觉。



馆小礼堂持续讲过一段时间的现代控制理论，那时他们就认识。据李老师回忆，会议期间，两人相谈甚欢，韩老师深入浅出地向李老师介绍了自抗扰控制，于是就有了后来与我们合作在新型号飞行控制系统设计中开展应用自抗扰控制技术的研究。有一次我跟着韩老师去和他们谈合作，一群他们相仿年纪的老航天人围坐在一起，热烈地回忆当年去听韩老师讲课的情景，我在一旁，看着这群老人说起往事脸上依然洋溢出青春的光芒，很感动，觉得控制室和控制室的老一辈，曾经带动那么多人一起挥洒过青春和热血，挺了不起的。这次韩老师坚持签了合同再开始做，对方要求我们到他们单位去做，在他们搭建的仿真环境和仿真条件下做，韩老师则提出他们派一个人跟着我们同时做，这样我们把自抗扰控制器调出来了，他们也就掌握了。韩老师是真的想毫无保留地把这个技术交给他们，满心希望他们能完全地掌握。这个项目做了比较长时间，合同时间是2004年11月—2005年3月，中间经过了一些波折，最后，我们根据合同要求完成了自抗扰控制的带舵机的半实物试验。试验做得很过瘾，需要上下两层楼的几个人配合完成，我在楼上发指令，大舵机在楼下，独占一个房间。2007年11月，项目通过了验收。

● 2007—2008年，承担航天D项目的飞行控制项目。这次好像是当时还在航天工作的孙老师主动来联系的韩老师，经过之前几个项目对不同飞行器特性和不同飞行要求的自抗扰控制应用研究，这时，我已经非常坚信ADRC是特别适合飞行控制领域的有效控制方法，做起来也已经比较轻车熟路了。只是项目还没做完，韩老师突然离世，不过我还是带着学生赵春哲、薛文超按合同要求完成了课题，项目于2008年9月通过验收。

十多年与航天工程师磨合，每次他们也会

拷问我们自抗扰控制的稳定性怎么分析。后来我才慢慢意识到，他们说的稳定性和学术界所拷问的自抗扰控制的稳定性是两个不同的含义，工程师说的稳定性其实是相对稳定性，也就是稳定裕度，在国标里是个明确量化的指标，没有这个指标，新方法就很难通过批准，也可能就是为什么我们每次做仿真甚至做试验效果都很好，但他们慎之又慎不敢用的原因。这个指标其实是线性定常系统的频域指标，是经典控制理论的内容。我只是在大学里学过，但学的时候完全不明白这个指标的工程含义，而现代控制理论就是另一套体系了，对非线性系统怎么建立这种类似的指标，目前在学术上也还没解决。记得当时韩老师还反问过他们，这个指标就真的可靠吗？后来，我们了解到在美国也有类似的情形，有些新方法即使试验效果很好，但因为无法给出稳定裕度的具体指标，负责人也是不会轻易签字通过的。

2012年，经过航天人员将自抗扰控制进一步工程化，自抗扰控制在航天的第一个飞行试验成功完成，与原有方法相比，自抗扰控制取得了更高的控制精度，能源功耗大幅度下降，全程平稳，没有大的波动，通过小增益实现了高精度控制，显示了ADRC中扩张状态观测器在线估计和补偿的强大优势。

回忆这个过程时，可以告慰韩老师的是，如今ADRC的研究已经枝繁叶茂，特别是这几年，振奋人心的应用成果不断出现，基于自抗扰控制的飞行控制方法已用于航天航空多个型号的飞行控制中，有些还获了奖。同时自抗扰控制技术还在能源动力、过程控制等诸多控制领域生根开花，硕果累累。





## 参考文献

- [1] 黄一, 张文革. 自抗扰控制器的发展. 控制理论与应用, 2002, 19(3): 485-492.
- [2] 丁曙初. 自抗扰控制器在炉温控制系统中的应用, 中国科学院系统科学研究所硕士学位论文, 1996
- [3] 韩京清、周力军, 自抗扰控制方法在“磁悬浮列车悬浮控制可行性试验(I)”中的应用, 技术报告, 1996
- [4] 周力军、韩京清. 不确定系统在线自寻最优点的一种新途径, 1997中国控制会议论文集, 633-636.
- [5] Huang Yi, Xu Kekang, Han Jingqing. Application of ADRC for Aircraft Attitude Control, Proceedings of the 3rd Asian Control Conference, 2000, 548552.
- [6] Huang Y, Xu K, Han J, Lam J. Flight control design using extended state observer and non-smooth feedback. In: Proceedings of the 40th IEEE conference on decision and control, Orlando, USA; 2001. p. 223-228.
- [7] 黄一、许可康、韩京清. Stewart平台精定位控制方案设计可行性论证报告, 2000.
- [8] 陈析彦, 黄一, 韩京清, 杨雨, 魏宗康. 基于自抗扰控制思想的动力调谐陀螺实验研究, 中国惯性技术学报, 2003.



【作者简介】黄一, 中国科学院系统控制重点实验室研究员。主要研究领域为不确定系统的估计与控制, 特别是自抗扰控制的应用和理论分析。