

音容犹在——与韩老师的闲聊

黄一 中国科学院数学与系统科学研究院

韩老师走了有十年了¹，如今自抗扰控制（ADRC）研究已经枝繁叶茂。一个学术思想能带动这么多人、这么多成果，是多少学者一生所追求和向往的。我相信韩老师对此一定是高兴的，今年的纪念活动我特意选了张韩老师喜气洋洋的照片，脑海中浮现的是当年和韩老师谈天说地中不断被启迪的时光。



图1 韩京清老师

第一次听说韩老师是1989年刚到中科院系统所读研究生的时候，和我同班同宿舍的一个女生是韩老师的学生，叫陈炎。我俩是系统所那年仅有的两个女生，颇有点相依为命的感觉。我是第一次离家，而且入学前对系统所和控制室几乎完全不了解，只是听长辈和学校老师都带着敬仰

说“中科院那可是科学的殿堂”，就稀里糊涂闯入了一个新世界。入学后才猛然发现我俩大概也是控制室那届研究生中仅有的本科不是学数学的学生，顿时有点懵，诚惶诚恐的。陈炎倒不以为然，她家是北京的，清华毕业，见多识广，很有北京妞的风范，处处罩着我，说起自己的导师，特别自豪：“我导师是控制界‘大拿’！”我那时对什么是“大拿”不太有概念，反而凭空添了更多的畏惧。

研究生的学习是茫然而新奇的，当时非线性控制、H无穷控制、智能控制、人工智能等正方兴未艾，我急切地想了解科学研究到底是怎么回事，自己到底能做些什么。所以室里不论什么方向的活动都想参加一下，看看究竟，室里老师对我们这些小屁孩也都挺好，不论是不是自己的学生，都带我们玩，毫无保留地与我们谈天说地，给我们答疑解惑、指点迷津。但其实那时我在韩老师面前还是比较拘谨的，大概因为韩老师平时是有点严肃不苟言笑的，又先被陈炎灌输了“大拿”的名号。一次室里元旦聚餐，这是控制室的

¹ 该文为2018年纪念韩京清先生逝世十周年而做，原文载于《控制理论与应用》2018年第11期“纪念韩京清先生逝世十周年专辑”，收录此刊时有少量修改。



传统，那时聚餐就是在一间大教室大家一起自己动手做吃的，几十个人每人带上自己吃饭的碗，集中放在一个桌子上，就分头干活了。我最喜欢这种活动了，每每这时窜上跳下、到处掺和。我干得正欢，忽听韩老师在旁边对我说：“你看桌上那堆碗，大小颜色形状都不同，一会开饭的时候，大家肯定一眼就能从这一堆碗中瞬间找到自己的，但如果按现在常用的if-then形式的算法搜索，先按大小搜，再按颜色找，再根据形状挑……且找不到呢！人脑一定不是按这种算法做搜索的，现在的所谓人工智能算法是有问题的！”

韩老师这不经意的几句话，在我脑海中却犹如一道亮光闪过，我本科毕业设计就是中医专家系统，拿到题目之初非常兴奋，跃跃欲试，要做人工智能了！然而当毕业设计按要求顺利完成后，自己却不甚满意，就是写了很多if-then语句，把病人症状逐个在中医病症数据库中查找再

加权，根据总和是否超过阈值判断是否有某一病证，总感觉中医诊病应该不是这么简单机械的，和自己幻想中的人工智能相去甚远，但又不知如何才能实现幻想中的智能。韩老师这几句闲谈如醍醐灌顶，一下解开了我的疑惑，大家都用得并不亦乐乎的算法也许从根上就有问题！这是我第一次被提示书中的方法和思路本身可能是有很大局限的，心中非常震惊，也暗暗折服韩老师平时思考问题的广度、深度及敏锐，聚餐时竟然能从一个几乎没人注意的现象联想到当前热点研究中一些根本性的问题，敬佩他以这么一个浅显的小例子一下让我醒悟做研究要从源头上去思考。直到今天，我还会常常想起那次元旦聚餐上韩老师这番随意的闲聊，反思自己的工作有没有从根上就出现偏差。

硕士毕业后到东南大学读博士，非线性控制、鲁棒控制、神经网络、模糊控制依然方兴

未艾，我也依然在新奇中茫然，努力想做点能解决真问题的的工作。常听学长前辈们聊做什么研究方向，听有前辈介绍经验“五年必须要换个方向”，心中暗暗担心凡事慢几拍的自己是不是不适合做这行。这期间大概只在参加中国控制会议（Chinese Control Conference, CCC，那时还叫全国控制理论与应用年会）时见过韩老师。大概是1992年的CCC，遇见韩老师，他关心地问我做些什么，我说在做鲁棒控制，然后韩老师说“其实一个系统里最关键的就是几个积分器，不论系统怎么复杂，把这个搞清楚了，就好控制了。”这番话在当时对我犹如禅语，高深空灵，却完全不明白。回去后还就韩老师这话请教过一些人，也都表示不明白什么意思。

在不明白中一下过去了十几年，我也为了驱逐心中一直挥之不去的迷茫，一头扎进了实际课题里，跟着韩老师、许可康老师把自抗扰控制（ADRC）用在各种各样的实际问题中：航天多个任务的飞行控制、FAST项目中的Stewart平台精定



图2 2000年在中科院大射电望远镜FAST预研究项目中提出基于ADRC的Stewart平台精定位控制方案



图3 2002年冬与韩老师、许老师、武利强在装甲兵工程学院进行ADRC火控系统实验

位控制（见图2）、多指机械手控制、大雪天和韩老师一起钻坦克做火控系统实验（见图3）、动力调谐陀螺的零位控制（见图4）等等，就想看看实际问题到底是怎样的，竟然就做到了现在。

2010年以后我开始思考：自抗扰控制到底解决了什么样的控制问题？它的普适性有多大？特别是2013年为准备ISA Transaction抗扰专辑的综述性文章^[1]，以及2014年准备中国控制会议关于自抗扰控制的大会报告^[2]时，再次思考自抗扰的故事应该从什么时候说起。在最早的一篇综述文章^[3]中，我们是从韩老师在1979年第一届全国控制理论与应用年会的一篇论文“线性系统的结构与反馈系统计算”中关于反馈系统的基本结构——积分串联形式的论述说起：“任意完全能控系统经过适当坐标变换和状态反馈均可化成最简单的积分器串联系统，这种现象不仅在线性系统中存在，而且在一类非线性控制系统中也成立”，见参考文献[4]。通俗地说，不论是线性系统还是非线性系统，在一定条件下，可以通过控制化为最简单的积分串联标准型。但在那篇综述文章中我更多

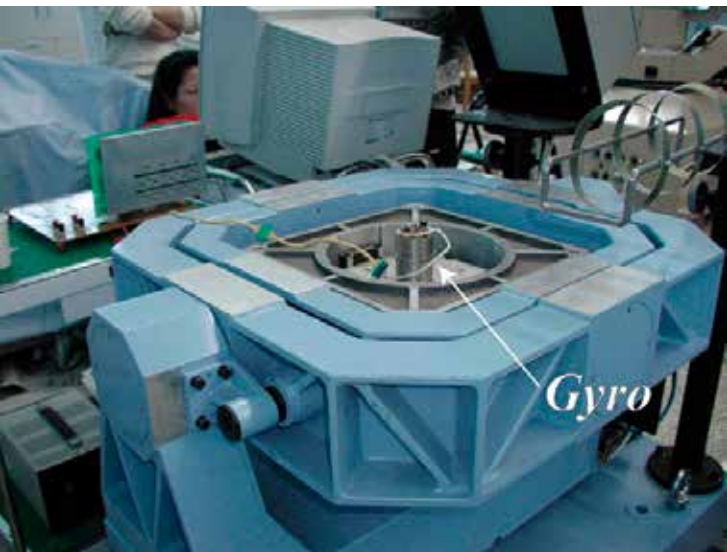


图4 2003年在航天13所进行动力调谐陀螺ADRC实验

的关注放在了其后半句对线性与非线性关系的论述上，因为由此引申出来的态度是“控制系统中的反馈作用打破了经典动力系统意义下的线性与非线性的界限，反馈能够把线性转化为非线性，也可以把许多非线性转化为线性”，见参考文献[5]。

在当时对非线性系统的研究如火如荼时，我猛然听到韩老师这番话也是脑海中犹如一道亮光闪过，印象太深刻了，敬佩其以四两拨千斤的智慧对待当时大家都认为很困难的非线性控制问题，这种智慧奠定了自抗扰控制的格局：在自抗扰控制的框架里，不再按线性或非线性、时变或时不变、解耦的还是耦合的来区分对象，自抗扰控制是在寻求一种可以对很广的一类系统进行控制的途径。

但当时我对其关于积分串联形式论述的前半句并没有太强调，因为这个形式真的太简单了，像是一类最特殊的系统。随着ADRC的影响不断扩大，我也不断地被问“ADRC可用的范围究竟有多广？”为了不再只停留在文字的描述上，我试着

从Isidori书^[6]中的一般仿射非线性系统这一非线性系统研究中较一般的形式入手，看看ADRC究竟能不能用，推导中忽然意识到原来Isidori的精确反馈线性化就是在捣腾非线性系统的积分串联型，只不过很多人被其所用的看似高深的李导数工具唬住了，而ADRC完全可以应用于对这类系统的控制，但走的是一条截然不同的路，瞄准的是不确定系统控制这一贯穿控制科学发展始终的核心问题。这时我才好像有点明白当年韩老师跟我闲聊时说的那番关于积分器的话语了，算来离那次闲聊已过了20多年。

做完关于ADRC的大会报告后，关注和研究ADRC的人大大增加，也有许多人注意到了其中的积分串联型，有一些尝试拓展ADRC的努力是想把简单的积分串联型拓展为更一般的形式。这时我发现这种拓展会引出诸如扰动的不能观以及不匹配等一系列啰嗦的问题，才进一步领悟到积分串联型虽然是最简单的系统形式，却不是某种特殊形式，而是控制系统内在的本质和关键。这种形式确保了总扰动的能观性和ESO估计总扰动的可行性，是ADRC中一个差点被我们忽视的核心思想，是她能够比较彻底地解决不确定系统控制问题/抗扰问题的原因所在，是她不同于林林总总的各种不确定系统控制或抗扰控制理论或方法的根本所在。这里面还有太多的宝藏有待挖掘，运用这个思想可以证明ADRC能用于更广范围的系统，ADRC的一些突出特点也可以更清楚地揭示出来。为这个问题我今年还专门和学生陈森一起仔细推导论证^[7]，在这个过程中，我每次有更深入的领会时都会不由得又回想起韩老师当年那好像轻描淡写的一番闲聊，似乎才醒悟过来，心中暗暗叹道“韩老师，您太老辣了！”每每此时，我都仿佛看见韩老师在天上笑咪咪地看着傻傻的还在努力想把这个问题弄得更清楚的我。

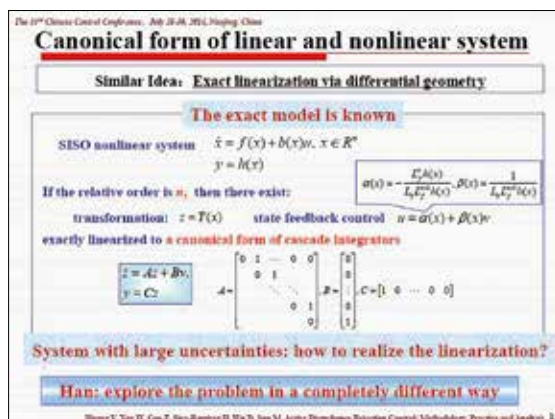
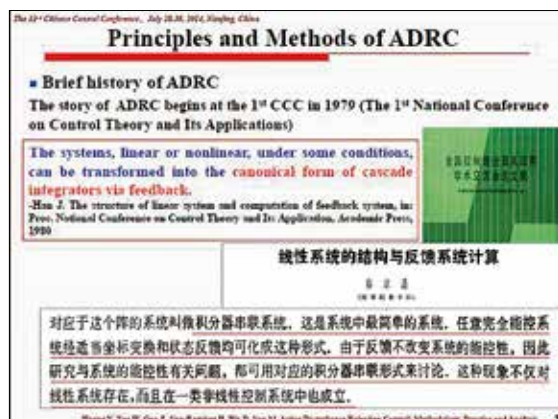


图5 2014年中国控制会议大会报告上介绍韩老师1979年关于积分串联形式是线性系统和一类非线性系统的一种共性的思想

和韩老师熟了以后不论有什么不明白都喜欢去找韩老师求点拨，而韩老师往往一句话就能拨云见日。还记得2000年第一次离开大陆去香港大学访问，因为内向，我对出访特别忐忑，但为了做研究似乎必须要出去交流，颇有点硬着头皮往前的感觉。出去后我感受到的第一个巨大冲击却是来自外面的媒体对内地的描述，头几个月几乎天天都在网上看有关内地的报道，心里挺沉重的。回来后和韩老师聊起，韩老师说：“看中国要从长远看，我们80年代第一次出国时，那简直是天壤之别的感觉，国外的一个塑料袋都当宝贝恨不得带回来。”一席话顿时让我心中开阔起来，直到今天，每当看见周围又出现了新事物还会想起韩老师这番话。

还有许多一拍即合的谈笑，比如说起鱼头的好吃，韩老师立刻眉开眼笑深表赞同地做托下巴状说“对对对，尤其是腮帮子这部分！”说起吃鱼头可是控制室资深饭桶间一道著名的梗，哈哈！

转眼韩老师走了有十年了，如今ADRC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。从1999年跟着韩老师、许老师跑航天做第一个姿态控制问题，提出基于自抗扰控制的飞行控制方法^[8]，快20年了，前后给航天一院、二院、三院、四院、五院、八院和九院以及航空部门都做过课题，目前基于自抗扰控制的飞行控制方法已用于我国航天航空多个实际型号的飞行控制中；高志强将自抗扰控制技术经过简化和参数化，已经应用于Parker Hannifin的高分子材料挤压生产线，2013年美国德州仪器公司推出一系列基于自抗扰控制算法的运动控制芯片；上海交通大



图6 2013年，美国德州仪器公司推出一系列基于自抗扰控制算法的运动控制芯片



图7 2017年ADRC在山西同达电厂300MW循环流化床机组协调控制回路投运



图8 ADRC用于多用途服务机器人的运动规划和避障控制中

学苏剑波将其用于所开发的几款高性能多用途服务机器人的运动规划和避障控制中；清华大学李东海老师和学生们与有关单位合作已经将ADRC在汕尾市海丰电厂1000兆瓦超超临界机组的低压加热器水位控制回路、广州市恒运电厂300兆瓦亚临界机组的磨煤机风温控制回路和过热汽温控制回路以及山西同达电厂300兆瓦循环流化床机组协调控制回路投运.....一个学术思想能带动这么多人、这么多成果，是多少学者一生所追求和向往的！

我相信韩老师对此一定是高兴的，所以今年的纪念活动我特意选了张韩老师喜气洋洋的照片，脑海中浮现的是当年和韩老师谈天说地中不断被启迪的时光。



图9 2018年7月19日-21日，第12届ADRC研讨会——纪念韩京清先生逝世十周年

参考文献

- [1] Huang Y, Xue W. Active disturbance rejection control: methodology and theoretical analysis, ISA Transaction, 2014, 53: 963 – 976.
- [2] Huang Y, Xue W, Gao Z, Sira-Ramirez H, Wu D, Sun M. Active Disturbance Rejection Control: Methodology, Practice and Analysis, 2014, Chinese Control Conference.
- [3] 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.
- [4] 韩京清. 1981. 线性控制系统的结构与反馈系统计算. 全国控制理论及其应用学术交流会议论文集. 北京: 科学出版社, 1981: 43-55.
- [5] 韩京清. 反馈系统中的线性与非线性. 控制与决策, 1988, 3(2): 27—32.
- [6] Isidori A. Nonlinear control system. 3rd ed. London:Springer-Verlag, 1995.
- [7] Sen Chen, Wenyan Bai, Yu Hu, Yi Huang, Zhiqiang Gao, On the conceptualization of “total disturbance” and its profound implications. SCIENCE CHINA Information Sciences, doi: 10.1007/s11432-018-9644-3.
- [8] 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. pp. 223 – 228.