三年从师, 一生追求——纪念韩京清老师逝世十周年

王学军
(晨星公司, 美国)

1 序

今年是韩京清老师逝世十周年. 本想能在七月份纪念韩老师的自抗扰控制研讨会之前写一篇纪念文章, 一直没能动笔. 六月底在北京拜见韩老师的夫人裴仁顺女士, 回忆又把我带回到了20多年前和韩老师朝夕相处的日子. 有些事情历历在目, 有些事情已经模糊. 我觉得能够把和韩老师在一起的经历和感受分享给大家, 会对自抗扰控制的进一步发展有所帮助. 在裴阿姨的鼓励下, 我下决心尽快完成了这篇纪念文章.

2 和韩老师相遇

人的一生是由不同的随机事件构成的. 当你把这些随机事件放在一起时, 你会发现似乎是一条有规律的线把它们连起来, 这条线决定了你的人生轨迹. 而我大学毕业后的人生轨迹是从认识韩老师开始的.

1988年我大学毕业前准备报考研究生. 在航天部710所的硕士招生简章上, 系统工程专业导师组成员有宋健、于景元、朱广田、韩京清. 因为当时宋健、于景元在人口理论方向很有名气, 我并没有在意韩老师的工作. 只是觉得韩老师和宋健、于景元在同一导师组, 一定也很了不起. 1988年夏天我考入710所系统工程硕士研究生, 导师是于景元老师和科学院系统所的朱广田老师.

当时710所研究生第一年的基础课都在合肥的中国科技大学上. 我在科大自控系选修线性控制理论, 正好是韩老师主讲这门课. 这是我第一次见到韩老师. 也许就是缘分, 韩老师对我很信任. 刚开课, 韩老师就派我去北京的科学院系统所为全班领取他写的《线性系统理论代数基础》一书, 用来作为课堂教材. 这也是我第一次遇到上课老师用自己的书作为教材. 从此, 韩老师在我心中就占有了很高的地位.

1991年3月我的硕士论文答辩, 韩老师是答辩委员会成员之一. 我的论文题目是《人口文化素质的定量研究》. 论文中有关于人口文化素质系统的稳定性和近期控制的讨论. 记得是答辩前的一天晚上, 我去系统所老楼的办公室拜见韩老师, 听取他对我论文的意见. 韩老师和我讨论什么是控制, 并介绍了他对控制理论研究新的思考, 即试图通过被控对象的观测信息, 而不是使用对象的数学模型, 来设计控制器. 他的思想一下子迷住了我, 使我看到了真正意义的控制理论. 控制理论的研究不再是局限于数学公式的推导, 而是融数学分析, 系统理论以及计算机仿真实验于一体的科学实践.

因为谈的很投机, 也是这次见面后, 韩老师问我是否愿意到系统所工作并给他当助手. 我当然欣然同意. 从此我就和韩老师以及他的自抗扰控制思想结下了不解之缘, 并开始了对自抗扰控制的研究、推动和应用.

图 1 韩老师参加我的硕士论文答辩会

3 三年从师

来系统所的第一个任务是帮助韩老师推广中国控制系统计算机辅助设计软件 (CADCSC) 的应用. CADCSC是国家基金委资助的大型科研项目, 总投入近100万人民币, 由全国十几所高校和科研单位, 近百名科研人员和学生参加, 韩老师是项目负责人. 要领导组织这样一个团队科研攻关是非常不容易的. 国家基金委能委任韩老师作为项目负责人, 可见韩老师在控制界的地位和组织能力不同一般. 我来系统所时项目正是收尾阶段, 这时韩老师已经考虑CADCSC的推广和应用问题. 我经常随韩老师去全国许多高校和科研单位去介绍和推广CADCSC. 同时韩老师也借这个机会介绍非线性PID(自抗扰控制的早期雏形)的基本思想. 也就是在1991年到1994年间, 韩老师提出并完善了以跟踪微分器和非线性组合为主体的非线性PID控制器的设计方法.

在韩老师的指导下, 我把非线性PID控制器用于6个自由度机械手的位置控制, 取得了非常好的仿真效

果. 在进行计算机仿真实验过程中, 我发现仿真步长和控制器参数有一定关联性. 一开始不能理解这一现象, 后来才知道是控制通道的最大增益值影响了控制器参数. 如果控制通道的最大增益值不变, 那么控制器的参数也就可以固定, 和系统的表达式无关. 我把这一发现总结为以下非线性PID控制器的特性.

给定一个二阶对象:

$$\begin{cases}\dot{x}_1 = x_2,\\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + u,\end{cases}$$

如果控制目标信号为 $v(t)$, 二阶导数 $\ddot{v}$ 存在, 并且 $|\ddot{v} - f(x_1, x_2)| \leqslant 1$, 那么一定存在一组确定的非线性PID参数, 当$t$充分大时, 使得$|v(t) - x_1| \leqslant \varepsilon_0$(给定的控制精度) . 这里$f(x_1, x_2)$具体形式无关紧要. 后来通过这一现象提出了受控对象时间尺度的概念, 并讨论了它对控制器参数的影响. 对于二阶系统, 受控对象时间尺度实际是由系统总扰动决定的. 具体地说, 它等价于对系统总扰动的最大值估计. 根据这一发现, 我和韩老师找到了一个自动调节非线性PID参数的算法. 在这个算法中, 最关键的是估计$f(x_1, x_2)$. 当时的一个尝试是利用跟踪微分器得到的二阶导数, 实时估计的值:

$$f(x_1, x_2) = \ddot{x}_1 - u.$$

由于我1994年来美国学习, 没有对这个方法做进一步的研究, 但这时我和韩老师已经意识到实时估计$f(x_1, x_2)$的必要性. 而估计$f(x_1, x_2)$所需要的信息就是系统的输出量y 和控制量u. 这一发现为后来扩展状态观测器ESO(实时估计总扰动)以及ADRC(直接消除扰动)结构的建立奠定了基础. 在ADRC结构里, $f(x_1, x_2)$的估计量$\hat{f}(x_1, x_2)$直接加到控制量u里, 从而使系统残余的总扰动$|f(x_1, x_2) - \hat{f}(x_1, x_2)|$限定在一个固定的范围, 这也就实现了非线性PID对系统总扰动有界的要求.

这三年期间我和韩老师几乎是形影不离. 韩老师经常带上我一起去讲课、作报告, 在办公室每天总是讨论非线性PID的问题. 在生活上他对我也倍加关心, 经常把我带到他家去吃饭, 还帮我解决住房问题. 韩老师在工作上是我的老师, 在生活上如同父辈. 从韩老师身上, 我不仅学习了科学研究的知识和方法, 更学到了很多做人的道理. 也就是在这一时期, 我对韩老师的自抗扰思想以及研究方法有了全面的理解. 我把这个领域归纳为基础理论研究(基于数学分析), 技术研究(基于计算机仿真), 以及应用研究(基于工程实验)三个方面. 韩老师以合理运用非线性为突破口, 摆脱模型的制约, 为控制理论和工程的研究开辟了新的方向. 可以这样讲, 韩老师是国内外控制界的第一位学者, 采用这种集数学分析, 计算机仿真和工程实验为一体的方法来研究控制理论和技术. 也只有用这种方法, 才有可能建立象ADRC这样独特的控制技术. 在后来20多年里, 我一直提倡用这一独特的思路指导自抗扰控制的研究.

虽然这时非线性PID控制器的研究仍限于计算机仿真和实验室实验, 韩老师已经考虑如何把它产品化了. 在韩老师的支持下, 我说服了几个懂硬件的朋友尝试用微处理器实现非线性PID控制器的算法. 这一工作虽因我后来去美国学习没能最后完成, 但是它使我对非线性PID控制器的实用性有了更多的感性认识. 出于对美国生活的好奇和向往, 1994年夏天我申请到美国攻读博士学位的机会. 尽管韩老师很希望我能留下和他一起继续非线性PID的研究, 但还是同意并支持我去美国深造. 我还清楚的记得韩老师当时对我说的一句话: “再有20年, 像你这样的年轻人就不会去美国了”. 后来的事实证明韩老师的预见是多么的正确!

因为我对韩老师的非线性控制思想深信不疑, 出国学习并没有让我停止对非线性PID控制器的研究. 出国时我对韩老师承诺, 我会在美国尽力宣传和推动非线性PID控制器的研究. 1994年9月30日我给韩老师写了一封信, 信中提到我会在美国继续非线性PID控制器的研究, 以弥补我离开韩老师的损失. 韩老师的夫人还一直保留这封信的原件, 后来把照片发给了我. 此后的20多年里, 我一直利用各种机会推动自抗扰控制的研究和应用, 这既是我个人的志向, 也是对韩老师的承诺.

4　见到高志强

1996年夏天, 我在伊利诺伊大学芝加哥分校攻读博士学位, 在克利夫兰州立大学任教的高志强老师和我联系, 说韩老师让我给他介绍非线性PID的思想. 以前类似的情况发生过多次: 韩老师经常让我给感兴趣的人去介绍他的非线性PID思想, 但来人发现很难发表文章, 听完后也就不了了之. 所以我首先问高志强为什么要研究韩老师的方法. 记不清当时高志强是怎样回答的, 最后我同意去一趟克利夫兰介绍韩老师非线性控制方法, 从此开始了我和高志强老师长达20多年的友谊. 高志强成为我不可多得的一位良师益友. 可以这样讲, 1996年和高志强的会面, 相当于把协助韩老师自抗扰控制研究的接力棒交给了高志强. 高志强以他对科学理想的执著追求, 虚心好学的研究态度, 不图虚名的治学理念, 以及超越世俗的为人风格, 通过20多年对自抗扰控制的技术的不懈研究、应用、推广和提高, 推动和领导了自抗扰控制研究的空前发展. 现在高志强已成为公认的自抗扰控制研究的领军人物.

1996年那次会面后, 高志强就一心一意开始了ADRC的应用研究工作. 我被他的执著精神所感动,

更因他对韩老师自抗扰控制思想的深信不疑而受到鼓舞. 随后我几次去克利夫兰一起参与仿真实验和讨论. 我深信高志强在克里利夫兰州立大学领导的研究团队将成为自抗扰控制技术研究的核心力量. 当时整个控制理论界对韩老师自抗扰控制思想并不认可. 我和高志强都认为技术研究以及应用的突破将带动自抗扰控制的理论研究, 并能极大提高控制理论界对韩老师自抗扰控制思想的认可. 正是在这样的环境下, 我们一起打电话说服韩老师亲自来克利夫兰指导高老师团队的研究工作.

到了1997年夏天, 韩老师终于来到克利夫兰州立大学讲学, 并指导ADRC的仿真和实验. 从此韩老师的自抗扰控制思想就在高志强老师领导的应用控制实验室扎下了根. 后来韩老师又再次访问克利夫兰, 使克利夫兰成为自抗扰技术的一个研究基地. ADRC参数与系统带宽的关系就是在这里发现的, 这一发现解决了ADRC参数整定这一关键难题, 为ADRC的广泛工程应用开辟了道路.

目前自抗扰技术已经被美国知名公司德州仪器(Texas Instruments)集成到电机控制的芯片中, 为自抗扰技术的广泛工业应用提供了基础. 随着德州仪器电机控制产品, 自抗扰技术一定会得到更多的实际应用. 另外据了解一家欧洲工控公司 Danfoss 吞并了以自抗扰技术为核心的美国克利夫兰公司LineStream Technologies , 说明自抗扰技术的工业应用领域正在日益扩大.

自从2000年以来, 高志强领导的研究团队一直是推动自抗扰控制技术研究和应用的主要力量. 自抗扰控制技术能够在理论和实际应用得到如此空前的成就, 是和高老师多年的不懈努力分不开的.

5 一生的追求

1997年底我开始在美国芝加哥的晨星公司(Morningstar, Inc)从事软件开发工作. 此后我虽然没有直接进行ADRC的研究工作, 但一直和韩老师、高老师保持经常的联系, 关注ADRC研究工作的进展. 我每次回中国都要去看望韩老师. 2008 春节期间我在北京探望韩老师, 并请韩老师和裴阿姨一起吃饭. 好像当时韩老师刚做完一个手术不久, 看上去有些疲劳. 但我们一直都在谈论ADRC的未来发展, 一直谈了很久. 没想到这竟是我见韩老师的最后一面!

韩老师去世后, 我继续利用各种机会宣传ADRC的基本思想, 鼓动每一个感兴趣的人参与ADRC的研究工作. 2010年利用回国探亲的机会去系统所介绍高志强的ADRC技术研究及应用成果. 前几年利用回国出差机会多次去广东电科院介绍ADRC并考察ADRC在火力发电系统控制的应用.

从去年开始, 我调入公司数据科学研究部门, 主要从事公司软件产品智能化的研究. 在高志强的启发下, 我将自抗扰的思想用于软件产品的智能化设计, 提出了基于控制论和自抗扰思想的智能软件的基本结构. 这一基本结构为公司开发智能化软件产品指明了方向, 并开始被公司软件产品部门所采用. 我现在正在考虑自抗扰思想在金融管理过程中的应用, 希望在几年后能有初步成果.

韩老师的自抗扰控制技术是对现代控制理论的一个革命性的贡献. ADRC有生命力是因为它同时解决了抗扰和跟踪这两个控制里的根本问题, 这是以前没有过的. 而且现在看来, 抗扰和跟踪也是智能的最基本体现. ADRC抗扰和跟踪的基本思想不但适用于一般工程系统, 还适用于诸如软件系统, 金融系统以及其它非工程系统. 所以说韩老师是一个开辟新时代的学者.

图 2 2005年和控制室老师们在北京系统所

那么韩老师是怎样做到这一点的呢? 我认为有这样几个方面:

首先韩老师坚持控制理论的研究一定要为工程实践服务. 这是他质疑现代控制理论的一个出发点. 传统的现代控制理论主要是以被控对象的数学模型为研究起点, 获得相应的控制器. 因为所有的数学模型都和实际对象有差距, 这样设计的控制器一般很难在实际工程中发挥应有的作用. 韩老师的《模型论还是控制论》一文正是对当时这种脱离实际应用的控制理论研究的批判, 并从此开启了不依赖具体数学模型的ADRC技术研究.

第二点是韩老师对科学研究义无反顾的追求. 要背离主流研究, 而另开门路永远是一个艰苦的历程. 只有对真理的全心全意的追求, 才能坚持下来. 道理很清楚, 但要做起来却艰难. 一般人很难做到. 从1991年一直到2008年韩老师去世的17年间, 韩老师的工作一直没能被主流研究认可, 科研经费, 研究生资源都不能到位, 也没有在国际学术刊物上发表论文. 唯一的一篇英文论文, From PID to Active Disturbance Rejection Control, 还是在韩老师去世后在IEEE Transactions on Industrial Electronics发表的. 而这篇论文

也是该刊物的主编主动邀请才投送的. 韩老师正是对ADRC思想的全心追求, 才能义无反顾坚持ADRC的研究.

第三点是韩老师开创了结合数学分析、计算机仿真、工程实验的控制理论研究方法. 只有这样独特的研究方法, 才有可能创立ADRC 这一独特控制技术. 韩老师有非常扎实的数学功底, 本可以轻车熟路的做些理论推导. 可是韩老师并没有停留于此. 他自己学会了编写计算机程序, 把自己的想法用计算机仿真程序表示出来. 这是ADRC 研究中很关键的一步. 通过计算机仿真, 可以很快验证自己的想法, 同时又激发产生新的想法. 不仅如此, 韩老师还把计算机仿真结果和有工程实践经验的专家交流请教. 并在实验室或工程环境中验证. 无论是仿真还是实验的结果, 又会被用来检验或纠正原来的想法. 这样的研究方法当时在系统所是独一无二的. 这是韩老师能成功开创ADRC研究方向的主要因素.

总之, 坚持控制理论研究为工程实践服务的目标, 对科学理念的无私追求, 结合数学分析、计算机仿真、工程实验的控制理论研究方法, 使韩老师成为控制界开创先河的导师. 这也是韩老师给我们留下的最宝贵的遗产. 我们后人要继承和发扬韩老师的这一精神, 继续推动控制理论的发展和应用, 为人类社会的幸福做出自己的贡献.

这是我个人的一生追求, 也希望每一个致力于自抗扰控制研究、敬仰韩老师的人把这一精神作为自己一生的追求.

王学军　现任美国晨星公司(Morningstar, Inc.)高级数据科学研究员. 他的研究兴趣包括人工智能, 控制论, 自抗扰控制理论, 以及在软件系统设计和开发中的应用. 在晨星公司工作的20多年里, 曾在公司软件技术开发和产品管理部门担任多项领导职务(网站分析部经理、技术部主任、客户数据部主任、高级产品经理). 从1991年到1994年, 作为韩京清教授的工作助手在中国科学院系统科学研究所任助理研习员. 在此后的20多年里, 一直致力于推动自抗扰控制技术的研究和应用. 2002年, 在美国伊利诺伊大学芝加哥分校(University of Illinois at Chicago)获数学博士学位.