

## 先天下之忧而忧——纪念韩京清老师逝世十周年

高志强

(美国克利夫兰州立大学, 俄亥俄州克利夫兰市 44115 美国)

十年过去了, 韩老师的音容笑貌依然历历在目, 他的言谈话语还绵延不绝地在我脑海中回放, 还激发着一波又一波的思绪、一个又一个的问题, 欲罢不能. 前两天一位老师感慨地说, ADRC 已经传到第四代了. 我相信它还会继续传承下去. 饮水思源, 一个 1958 年大学毕业, 在文革中备受磨难、几乎改行的学者, 如何做得如此不同凡响、让人念念不忘? 他几十年如一日的勤勤恳恳又是为了什么? 古人说: 成大事者, 争百年, 不争一息. 忽然间, 我好像有点明白了. 我结识韩老师是从他和许可康老师写的《线性控制系统理论》一书开始(图1, 左). 韩老师亲口说, 写这本书的原动力来自对 Wolovich(我博士导师的导师)结构定理的质疑. 书里独特的构造性方法富有中国古代数学的特点和中国学者的自信. 许可康老师 1996 年亲自到 CSU 讲学(图1, 右上), 如数家珍式地传授这个严密、精巧、直观的理论, 让我再次感受到控制理论的美和海阔天空(第一次是 1985 年在圣母大学听 Charles Rohrs 讲古典控制论). 我在与韩老师的交谈中发现, 小到精细的算法大到宏观的理论, 韩老师常常让我耳目一新(图1, 右下).

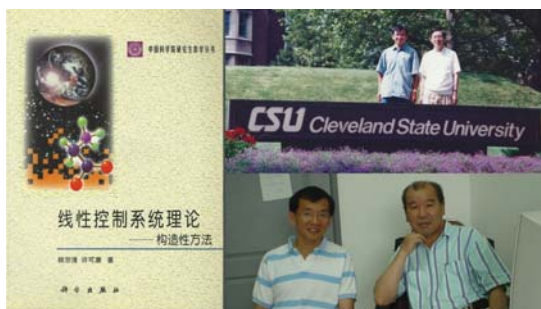


图 1 作者早年听韩老师、许老师传授线性控制系统理论

改革开放后的第一次全国控制会议 1979 年在厦门召开, 有 65 个单位 125 人参加, 60 篇论文. 论文集的目录显示了当时人们关心的问题. 韩老师在“线性系统的结构与反馈系统计算”一文中指出, 不管是线性还是非线性系统, 其动态关系在一定的条件下通过状态变换和反馈, 都可以化为所谓积分器串联型. 从线性系统理论到 ADRC, 韩老师后面的工作再没有离开过

这个标准型. 我们不妨称其为韩氏标准型, 或韩氏型. 它反映了控制系统中被控对象最基本的特征: 控制量与被控变量各阶导数之间的关系, 因为所谓控制不过是通过前者改变后者而实现的. 韩氏型则使二者之间的关系一目了然, 使控制器的设计得以务本.

厦门会议后的十年里, 韩老师逐渐开始怀疑现代控制理论的模型前提: 自然界中的控制系统肯定不是依赖数学模型建立起来的, 我们为什么要墨守成规? 1989 年是他的研究从“模型论”走向“控制论”的转折点. 在经过了近十年的艰苦努力之后终于实现了他的设想, 创建了自抗扰控制(ADRC), 说明所谓“鲁棒性”问题不过是“Kalman 体系中依靠(A, B, C)模型的理论与控制工程实际之间矛盾的产物”. 控制系统的设计应该依靠的是时间尺度、时滞、控制能力范围等物理意义明显且容易获取的信息, 而不是被控对象详细、准确的线性模型.

质疑模型前提的学者不只韩老师一个, 文献里也不缺各种“无模型”控制方案. 它们都各有可取之处, 但是 ADRC 不是无模型控制, 它的起点是对“模型”、“扰动”等等基本概念的重新定义. “模型”的概念在 ADRC 的框架中与自然科学不同; 建模为的不是精确描述一个物理过程而是方便对它的控制. 在这里对象被看成韩氏型+“扰动”. “扰动”在文献中一般指外扰, 即独立于系统状态的外力; 可是在 ADRC 的框架中它是广义的, 是内扰和外扰对系统作用的总和. 韩老师为了区别起见称之为“总扰动”. 总扰动被估计和抵消之后, 就只剩下韩氏型所代表的理想动态. 所以说大道至简!

我和博士生蒋方军从 1997 年初开始, 在韩老师和许老师的指导下, 学习和尝试 ADRC, 并且进行了初步的仿真和实验. 1997 年夏天韩老师亲自来到我们实验室和我们一起做 ADRC 的运动控制实验. 在这个皮带传动的伺服控制系统中, 除了提供控制力的马达之外还有产生扰动的马达; 皮带的张力、传动环节的摩擦力和齿轮间隙也是可调的. 所以, 工业生产环境中的很多现实问题都可以在这个实验台上重现.

韩老师来之前小蒋已经在这个平台上用C语言实现了韩老师提供的ADRC算法,可是由于我们的理解不深,在参数整定上不得要领,几个月下来实验结果一直不太理想.韩老师到了以后指导小蒋改了几个参数,不到半个小时就调试成功了,而且效果惊人.实验结果也让韩老师备受鼓舞,他高兴地与我们合影留念(图2).回国后,他很快就发表文章正式地提出ADRC的框架和算法,包括TD、非线性ESO和非线性状态反馈.可以说这是ADRC的第一代算法,是ADRC技术工程化的起点.



图 2 作者、博士生蒋方军和韩老师1997年刚刚做完首次ADRC运动控制实验

韩老师开创ADRC的意义深远.他深刻地把握工程问题的本质,打破学术研究中的种种条条框框,披荆斩棘,为工程控制开辟了一条实验科学之路.他意识到理论研究必须兼收并蓄,因为从瓦特的飞锤控制器到PID,目前工程上行之有效的控制律并不是在一个应用数学的公理系统里推导出来的,而是在实践中自下而上,通过长时间地摸索、发现、整理、抽象、提高出来的. ADRC一方面吸收了“基于误差消除误差”这个在工程上久经考验的设计原理,另一方面吸取了现代控制理论的精华:状态空间法和状态观测器.其突破点是富于想象力的总扰动概念和升阶的观测器(ESO).这既不是理论上能够推导出来的,也不是工程经验的总结.归根结底,这是个脚踏实地的异想天开!

ADRC实现了韩老师1989年提出的从“模型论”思考方式到“控制论”思考方式的过渡,说明“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”是完全切实可行的.我们在1997年运动实验成功之后又经过了四年的消化和吸收才初步掌握ADRC的理念,并首次在2001 CDC上向国外学者介绍了ADRC.2002年我再去拜访韩老师的时候,他的ADRC团队已初具规模(图3),大家对未来都充满了信心.这时候ADRC面临的挑战主

要是参数整定,这也是ADRC技术工程化的最后一公里.



图 3 逐渐壮大的ADRC团队(左起:夏元清,陈忻彦,姜巍,黄一,高志强,韩京清,高龙,万辉,侯增广,张文革,黄焕袍)

参数整定不是一个简单的应用问题,它涉及算法的可移植性(scalability),本质是理论研究与工程实践两种知识结构的融合. Astrom教授曾在2012 ACC大会报告上不无遗憾地说,自适应控制没有能够广泛普及,原因是没有做到可移植(scalable).很多学术研究的成果到了工程上就卡住了也是这个原因;文献里面的应用文章应有尽有,能够工程化的寥寥无几,根子也在这里.事实证明,只有用工程师的语言把新理念无缝衔接到他们的知识结构中去,才能实现从学术思想到工程技术的过渡.

我曾经有个百思不解的问题:工程上控制器和滤波器的设计思想非常接近,为什么后者具有可移植性而前者基本没有?受韩老师时间尺度概念的启发我有两个初步的想法:1)用频率和增益尺度概念使被控对象模型标准化;2)用极点配置把所有控制器的参数都变成带宽的函数,即控制器的带宽参数化.我们发现把后者引入ADRC特别方便工程师的接受,因为带宽的概念物理意义清晰,深入人心,能使ADRC的优势一目了然,也能使参数整定简单、直观,从而大大降低ADRC工程化的门槛.不管是运动控制芯片还是工控设备(PLC, DCS),ADRC技术的实现一般都是基于经过带宽参数化的第二代算法.

这些年在推广ADRC过程中我还有幸结识了很多优秀的年轻学者和工程技术人员,感觉ADRC的思想正在他们手中与工程实践进行新一轮的整合,形成丰富多彩的第三代算法.而ADRC作为概念已经超越了算法的范畴,形成了一个崭新的开创性平台和新一代控制技术的奠基石.韩老师的梦想正在成为现实.

韩老师最后一次来CSU访问是2003年,他早年的

得力助手王学军也从芝加哥赶来,与我们在美丽的伊利湖畔欢聚一堂.这时我们这边的ADRC团队也初具规模.这些参与创建ADRC技术的第一代学生后来对它各种形式的推广起了不少作用,至今还未中断.韩老师来了以后做了一系列的讲座.在学校给学生讲(我翻译),在家里给我吃小灶.前后一个月,让我们收获满满、赏心悦目. ADRC工程化的进展也让韩老师备受鼓舞.临走前他还打印出几乎完整的书稿送给我.

一晃十年过去了, ADRC的发展有如星火燎原.一转眼,我们这一代人的职业生涯也即将落幕.我们今天纪念韩老师不禁扪心自问:他到底给后代留下了什

么?是什么力量使他在改革开放后脱颖而出,走在了时代的前列?

也许归根结底,是一颗“天下兴亡,匹夫有责”的心.他以天下为己任,不计个人得失.要不然一位曾经给华罗庚、王元、万哲先等著名数学家做助手的理论工作者,怎么会去关心工程师的烦恼和工控技术的兴衰?怎么会为了这个行业的前途,在自己学术生涯的顶峰,毅然决然地挑战业内的约定俗成?怎么会以他的余生为打破工控技术的停滞不前奋斗不息?

我们学习ADRC从算法开始,然后是思想,最后是精神,“先天下之忧而忧”的精神.