

月明图们忆先生

郭宝珠 中国科学院数学与系统科学研究院

1978-1982年我在山西大学数学系求学，主修控制理论。这大概是中国历史上少有的特殊时期，物质的极度贫穷和精神的极度富有巧妙天衣的风云际会。值国家乱后初兴，时任中国科学院院长的郭沫若先生在他传奇的革命与学者生涯的最后一年写下了“科学的春天”来赞美那个年代，文学家徐迟先生写有“歌德巴赫猜想”一文，遍传九州。少年的我一改中学的散漫，开始折节读书。可是能在大学的图书馆里看到的大多数数学著作是1950年代从苏联翻译过来的教科书和为数不多的参考书，我至今仍然记得第一次精读完叶菲莫夫的《高等几何》所产生的前所未有的震撼。能听到的中国数学家的名字也大部分出自中国科学院，自然的，在极易产生崇拜的年龄和对科学狂热的氛围之中，对许多苏联科学家和中国科学院产生了无上的敬仰。

我就在那个时候听到了韩京清教授的名字。主讲古典调节原理的梁嘉华老师正是在1978年前后在北京听到韩京清教授的演讲后给我们开设了这门在数学系不常有的控制理论的基础课，因为韩京清教授对古典调节原理的理解非一般人所及。实际上，现在中国控制界里有不少人正是从韩京清教授的普及性课程中得到了控制理论的启

蒙教育从而开始了自己的研究。主讲线性系统理论的孙景生老师曾经在系统科学所进修并和韩京清教授合作写过论文。1980年代初，中国的科学在文革停顿10年后艰难起步。和今天不同的是，每个大学其实都差不多。大学的老师以教书为主，如果有谁在科学院的学报上写篇文章，就几乎会全校知名。当时的电影写知识分子，总有一句台词说：我正在写一篇论文。于是写论文便成了一件无上荣光的事情。可以想象，沉浸在教科书世界里少年的我听到教课的老师在韩京清教授的指导下写作论文，是何等的震撼。

1982年我从山西大学毕业后在中国科学院系统科学研究所开始了研究生学习生活，韩京清教授就成了我们的韩老师。虽然平时并不常见他，可是他直接指导的学生和我们朝夕相处，所以韩老师的事迹知道的渐渐多了起来。真正走近韩老师是我研究生毕业以后的1985年。当时我到北京信息与控制研究所工作，有鉴于国家人口的过度压力，宋健、于景元等先生开始了利用控制理论研究中国人口问题，我自己的研究就在人口控制上起步。韩老师的研究工作逐渐进入我的视野，因为韩老师那时候学术活动频繁，就人口问题与当时的许多人，包括位于夏威夷的美国东西方人

口研究所的研究人员合作，这大概是人口控制的黄金时期。我亲耳聆听他关于中国人口问题的各种报告，他用看似初等的“三角形方法”给出了人们梦寐以求的人口年龄结构控制的具体形式。影响最大的是他关于中国三年困难时期人口问题的科学论断，对于所谓饿死三千万的无聊谣言因此而不屑一顾。

中国的人口计划是一胎化。其中一个指标叫总和生育率，大致描述平均每个育龄妇女一生所生育的总数。这个单个的变量却能使得人口年龄结构在生育期内实现转移，用控制理论的术语讲，就是人口系统可控。想想这是一个有60个状态变量，而控制变量只有一个的实际系统，就知道这是多么奇妙的一件事情。可是计算这个数值却并不容易。韩老师给出了一个基于他定义的生育基数的奇妙算法，至今仍然是国家计生委计算总和生育率的方法。我饶有兴趣地看到他在美国东西方研究所期间独到的研究成果，这个后来被称为胎次递进的方法，演绎了不同胎次比例下中国人口可能的结果，因为在中国一胎化事实上根本做不到。他语重心长地写下了他的结论，其中一个是一千万警惕中国在2015年前人口突破13亿。可是人生不如意者十常八九，计划总是难以赶上变化。直到今天，每当看到他的那些报告和中国人口的现实，别有异样的感觉总会涌上心头。

1989年我在香港中文大学读书，韩老师在韩国出席国际会议后路经香港，我的老师让我以数学系的名义接待他。让我略感惊奇的是他对当时每位来自中国大陆的访问学者向往的香港资本主义花花世界并无兴趣，却在我的宿舍里谈了一上午他对控制理论的新思考。可惜我那时对他的思想似懂非懂，这些思想后来发展成了他1989年发表的著名论文：“控制理论——模型论还是控制论”？也是他最后提出石破天惊的自抗扰控制

技术的前奏。

我在1991年结束博士学习后以博士后的身份再次回到系统科学研究所。有一年的时间名义上的合作老师正是韩老师。自然的，我也希望看看他的跟踪微分器，可惜一来总是不得要领，二来我那时对做一个应用数学家的兴趣远超过控制理论本身，所以并没有深入下去。1990年代末，我远在南非的一所学校，有一天夏小华教授告诉我说IEEE TAC有一长文，讨论一个正弦信号的频率估计问题。直觉的，认为那实在是牛刀屠鸡，跟踪微分器足可以解决这个简单的问题。我写信告诉韩老师，他很快做了一个数值实验，我则给了一个基于线性跟踪微分器的简单证明，这是我和他合写的唯一论文。当我准备把结果在一个美国举行的控制理论应用的会议上宣读的时候，韩老师介绍我认识也去参加会议的高志强教授。高教授驱车几百里带我去看阿拉斯加的冰川，留下了极为宝贵的记忆，我们对韩老师刚刚发表的自抗扰控制理论怀着共同的期待。

众所周知的，志强教授在美国用自抗扰控制技术解决了许多工业的控制问题，用实践证明了其巨大的威力，特别是他在帮助韩老师翻译的文章^[1]中向英文世界全面介绍了自抗扰控制技术，其优美的英文常常是我自己和教育学生的范本。与此同时，许多中国的高校也不断加入自抗扰控制技术的应用研究中来，这其中也包括在各个高校韩老师亲自指导过的学生，甚至是他学生的学生，黄一研究员就在系统科学所领导了不少的航天项目，自抗扰控制技术起到了关键的作用。几乎每年的中国控制会议都有自抗扰控制技术的专门研讨会。直到2013年，志强教授和黄一研究员在美国的控制年会组织了自抗扰控制技术的专题，第一次将诞生在中国的控制技术堂而皇之地引入国际控制科学的舞台。遗憾的是，我自己



的研究兴趣却因为项目的驱动更多地转移到偏微分方程控制理论上，只是不断听到自抗扰控制的新进展。韩老师虽然已年近古稀，但文思泉涌，经常在我出国回国的间隙驻足我的办公室，谈他的最新思想和不可思议的数值实验。显然的，他已经感受到了这个理论可能的远景。我几乎目睹了他完成自抗扰控制技术专著的全过程。万没有想到的是，就是在送这本书的校稿到出版社的路上他倒了下去，没有再能回到他心爱的研究中来。

可是我的脑海中并没有离开过他的理论。这其中主要的原因是我对控制理论的理解发生了巨

大的改变，而这些改变自然会与自抗扰控制不谋而合。控制理论是二次世界大战期间产生的新理论。由美国数学家维纳在1948年所开创，研究机器对信号的接收与处理，终极目标是使得机器用人脑一样的思维操纵系统。事实上，早在古希腊时代，哲学家亚里士多德曾有这样的梦想，希望有一天机器能代替人工，使我们能从繁重的体力劳动中解放出来，而体力劳动正是中国的圣人最看不起但又不能没有的职业，圣人比起神仙来还差得不是一星半点，不吃饭子曰诗云会变成呜呼哀哉。论语记载说樊迟请学稼，子曰，吾不如老农。樊迟出，子曰，小人哉，樊迟也！当然例外也是有的，郑板桥先生就认为世界上农人最有用，其它的事实上可有可无。可惜板桥先生身前身后数百年，只不过被看做不得意的文人，所以中国人至今也不大瞧得起农民。机器思维的梦想理论在维纳的手里首先得以在数学上

实现，其实主要还是在哲学上实现。1950年代初，钱学森先生在美国因共产党的嫌疑被迫停止了他的军事研究，转而把维纳的思想在工程中首先实现。他在1954年出版的《工程控制论》因此成为继维纳之后第二本里程碑式的控制理论经典名作。他在晚年回忆说，当他准备回国，把这本新出版的书送给他的老师、空气动力学大家冯·卡门时，本身与控制论无缘的冯·卡门却说你在学术上已经超过我了，可见这本书给世人的震撼。钱先生晚年抱怨中国的大学培养不出人才，实事求是讲，以他这样百年不遇、书生报国的奇遇经历要求中国的高校，实在是勉为其难了。大体来

说,经典控制理论从1940年到1960年,研究单输入、单输出时不变系统,办法是传递函数。1960年,第一次国际自动控制联合会(IFAC)在莫斯科举行,三位世界级的数学家,苏联的庞特里亚金、美国的贝尔曼、卡尔曼报告了他们的成果,开启了1960年到1980年现代控制理论的新时期。这个时期的研究以数学模型为出发点,研究多输入、多输出系统,办法是状态空间法,各种数学工具轮番登场,理论成果可谓层出不穷。

问题是控制理论是以工程应用为目的的基础理论,数学则是控制理论本身的基础。当一个确定的系统在理想环境中运行的话,控制的问题迟早会因为技术的进步而变为制造业的问题。于是1980年以后许多研究不确定系统的控制理论就多了起来,这才是控制理论真正有用的地方,因为数学模型不容易建立,或者建立了也有许多的东西不知道。有名的对付不确定性的理论如鲁棒控制、H-无穷、滑模控制(略早一些)、高增益理论就在1980年代以后发展起来,还有1970年代就发展的关于输出调节的内模原理等。有次开会,和鲁棒控制的专家周克敏教授闲聊,他说鲁棒控制总是做最坏的打算。其实这个特点是以上提到的这些著名控制设计方法共同的特点。1930年代红军在江西苏维埃根据地遭到国民党的多次围剿,最后一次,李德、博古先生就提出了一种“拒敌于国门之外”的以牙还牙理论。可是实现这个目标的前提是红军必须至少和敌人一样强大才行,好比林彪在东北战场说“我不要伤亡数字,我要的是塔山”,因为林彪那时已经有这样说的资格。如果用内模原理来说,就是控制中有一个环节至少和系统中的不确定一样才能抵消不确定。问题是现实的情形是红军没有那么多,结果是预料中的,红军越打越少,直到几近全军覆灭。危急存亡之际,红军在遵义请出毛泽东同

志,他以3万劫后疲惫之师对付国民党30万现代化大军的围追堵截,四渡赤水,兵逼贵阳,巧渡金沙,演义了中国革命的传奇。毛主席晚年回忆说他一生军事生涯的得意之笔正是四渡赤水。这一策略的精髓就是“在运动中捕捉战机,集中优势兵力,歼灭敌人的有生力量”。而韩老师的自抗扰控制正好是这样一种对付不确定性的控制策略。

虽然自抗扰控制是个庞大的理论体系和全新的思想,但主要由三部分组成:第一部分称为跟踪微分器。这一部分实质性地改造了PID技术中其实是PI的被动局面,因为微分D由于噪声等的干扰在实践中会放大噪声而不能物理实现。虽然这个问题已经有研究了,但韩老师的理论其实就是从PID出发反思现代控制理论开始的,因为PID至今仍然是工业控制的主要方法,而PID恰好不讲数学模型。纵观历史上的伟大科学发现,许多就是这样不满现状,而追根溯源后提出而发展的。这个问题在1989年韩老师的文章中事实上已经提出。我们近时的论文^[2, 3]正是对韩老师自己提出的跟踪微分器的收敛性证明,已经基本接近韩老师设想的目标。自抗扰控制的第二部分是扩张状态观测器,这是最神奇的一部分。因为这个理论第一次的提出要对所有的大不确定性,这些不确定性来自系统本身或外部干扰,进行估计。这正是在“在运动中捕捉战机”的精髓,虽然我们在自适应控制中看到这一思想的种子,但那里的不确定主要是参数,情况要简单得多,且在没有激励的条件下,参数递进还不一定收敛,当然这是自适应控制奇妙的优点而不是缺点。传统的观测器仅估计状态,但扩张状态观测器还要估计不确定性。我们在[4,5]给出了一个在非常一般情形下的理论证明,揭开了20多年来的状态扩张观测器的神秘面纱。自抗扰控制的第三部分是基于

跟踪微分器、扩张状态观测器的输出反馈，就是把不确定的东西用其估计值消掉，系统因此变为线性时不变系统，这好比是把曲线变成了直线，剩下的当然你愿意做什么都是可以的。可是这一部分20多年来始终笼罩在神秘的气氛之中，事实上许多人由于其理论基础的不明朗，而研究又限于数值试验和工程实践之中看不清其庐山真面目而归之于“祖传秘方”。但这个却是“集中优势兵力，歼灭敌人”的最后一步，控制理论上称为“分离性原理”，对非线性系统一般并不成立。我们在最近的论文^[6]全面展示了这一理论对多输入输出系统的前因后果，给出了相当一般情形下的收敛性的证明。这一研究的三部曲终于使得自抗扰控制技术完整地展现在世人面前，而有了坚实的理论基础。

理论上加以佐证的是我们最近用自抗扰控制技术对无穷维不确定系统控制的不可思议的成功运用^[7-12]。

我本人从事控制理论的研究过20年，得意的研究成果自然会有几个。但像对自抗扰控制理论的研究成果我还是按捺不住少有的激动。道理很简单：如果你认为毛泽东思想对中国无产阶级革命起过决定性指导作用的话，自抗扰控制技术就命中注定要在控制理论中留下她应有的踪迹。

韩京清教授是朝鲜族，成长于长白山的图们江畔，青年时代曾远赴莫斯科求学，为人慷慨有大节。有次在实验室的晚会上看到他和夫人翩翩起舞，也有幸在从重庆到武汉的轮船上面对滔滔长江听他讲科学以外的故事。1990年代末我在法国买了平生第一盒雪茄，偶尔也会吐雾腾云一



番。有次韩老师路过办公室给了他一支尝尝，不料他走时却不慌不忙的把一盒全装在自己的口袋里带走，梦牵魂绕之际，他好像难以对付生活中的不确定性，不幸的，这也包括他自己的健康。他生于国家危急存亡之秋，其研究带有他们那一代人强烈的科学救国梦想和民族自尊心。他对学生可以说是无微不至的关怀，但有时也因学生，这也包括我自己，不能跟上他的脚步而缙山华顶，广陵绝散。这后一点其实一点也不难理解。最近看电视剧《楚汉争雄》，刘邦先生的帐下的确热闹非凡，但可关注的人远非刘邦自己，张良和韩信就说不完道不尽，可是在西楚霸王的军营里除去项羽还是项羽。他在暮色苍茫之中奋其智勇，虽千万人吾往矣，为往圣继绝学，为来世开太平。在他逝世5周年之际，写下我的回忆，我最激动人心的一部分时间是在和这位伟大的学者、老师和朋友的心灵沟通中度过的。

青年赴道邦，所学何为？知行合一唯报国，暮岁犹壮思，桃李天下，月明图们忆先生。

参考文献

- [1] Han L Q. From PID to active disturbance rejection control. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 2009, 56: 900–906.
- [2] Guo B Z and Zhao Z L. On convergence of nonlinear tracking differentiator. *International Journal of Control*, 2001, 84: 693–701.
- [3] Guo B Z and Zhao Z L. Weak convergence of nonlinear high-gain tracking differentiator. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58: 1074–1090.
- [4] Guo B Z and Zhao Z L. On the convergence of extended state observer for nonlinear systems with uncertainty. *Systems and Control Letters*, 2011, 60: 420–430.
- [5] Guo B Z and Zhao Z L. On convergence of nonlinear extended state observer for MIMO systems with uncertainty. *IET Control Theory & Applications*, 2012, 6: 2375–2386.
- [6] Guo B Z and Zhao Z L. On convergence of the nonlinear active disturbance rejection control for MIMO systems. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2013, 51: 1727–1757.
- [7] Guo B Z and Zhou H C. Active disturbance rejection control for rejecting boundary disturbance from multi-dimensional Kirchhoff plate via boundary control. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2014, 52: 2800–2830.
- [8] Guo B Z and Jin F F. The active disturbance rejection and sliding mode control approach to the stabilization of Euler–Bernoulli beam equation with boundary input disturbance. *Automatica*, 2013, 49: 2911–2918.
- [9] Guo B Z and Jin F F. Sliding mode and active disturbance rejection control to stabilization of one-dimensional anti-stable wave equations subject to disturbance in boundary input. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58: 1269–1274.
- [10] Guo B Z and Zhou H C. The active disturbance rejection control to stabilization for multi-dimensional wave equation with boundary control matched disturbance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015, 60: 143–157.
- [11] Guo B Z and Jin F F. Output feedback stabilization for one-dimensional wave equation subject to boundary disturbance. *IEEE Transactions on Automatic Control*, in press.
- [12] Guo B Z and Feng H Y. Output feedback stabilization for unstable wave equation with general corrupted boundary observation. *Automatica*, 2014, 50: 3164–3172.