

# 漫谈系统与amp;控制

## 我的求学和科研经历漫谈

张维海 山东科技大学电气与amp;自动化工程学院

中国自动化学会控制理论专业委员会随机系统控制分委员会主任邓飞其教授在2015年4月邀我写一个材料，介绍一下自己的求学和科研代表性成果，然后在全体分委员会的邮件群里推介我。一开始我跟邓教授说别让专家笑话了，不够格啊。确实的，我非长江和杰青之类的大专家，科研上也没有突出的成果，而且今年已经50岁了，到了知天命之年，这个年龄的人心态都有了变化，名利已经看淡，只想追求一种平淡的生活。但是在邓教授的鼓励下，我还是写了个材料，本文就是这个材料的修正版本，今奉献给读者，请大家不吝赐教。

### 一、求学之路

我是1965年12月31日生，山东省莱阳市人。这个生日差一天就是1966年了，而在中国很多以年龄划线的申报机会都是以某年的1月1日后开始，这也使我错失了一些申报奖励的机会，差一天就差一年啊，但出生是不可选择的。我的家庭自我记事起就双亲有病，一直是农村中最贫穷的家庭。从1973年9月至1978年7月在本村读了5年的小学，那时候的成绩很不好，就是贪玩了，经常放学被老师留下继续背东西，回家后母亲问我

为什么邻居的孩子都回来了你却这么晚，只好谎言以对。有几次被老师打哭了，只好先去河里洗把脸再回家，怕被家长看出来。记得一年级的的时候，因为拼音没有学好，老师让背“好好学习，天天向上”，我总是把“向上”按照当地话读成“xiang xiang”。另外，数学是我最怕的课，圆的面积，圆锥的体积甚至九九乘法表我总是背不过来。因为语文和数学的上述问题，老师把我放学后留下过多次。整个小学5年都是混过来的，所以最后连个红领巾也没有戴上，导致我小学的时候最怕过六一儿童节了，因为全班就我自己没有红领巾可以戴。我在12岁的时候父亲去世了，这促使我开始懂事了，也开始朦朦胧胧地考虑自己和家庭的前程了。

1978年9月开始读初中，这个时候首先是对数学感兴趣了。开始学习的是代数、分解因式、一元和二元方程、列方程解应用题等等。我记得第一次初中数学考试得了76分，高兴了很多天，因为以前从来也没有及格过。到了初中的二年级，开始学习平面几何，这真正引起了我对数学的兴趣，特别是加辅助线，真是奇妙！一时间班里同学有难的几何题都来找我，这使我很洋洋自得。我在初中自己编写了一些几何题并给出证明。我

曾经自己证明过欧拉的一个定理，即三角形的内心、垂心和外心三心共线。我也曾经自编自演了一个题（虽然以后看趣味数学知道这是历史上的著名问题）：三角形的内部不存在一个点到三个顶点的距离之和最长，但是一定条件下存在一个点到三个顶点的距离和最小。以后学习了高中的二次曲线我又去思考这个问题，并且自认为给出了一个奇妙的非常简单的证明。过了这么多年，我仍记忆犹新。到了初中二年级的下学期，当时全公社（“公社”现在叫“镇”了）的初中要选拔成立2个重点班，我有幸考上了，现在回想起来难度还是很大的。我经历过硕士班和博士班，但是初三那个班级的同学确实令我佩服，我从来也没有经历过那样激烈的学习竞争压力。

1981年7月我初中毕业顺利考上高中，但是这个时候我母亲的病加重了，在学校总担心她的安危，不得已高中不到半年的时候辍学了，带着母亲到处看病。第二年母亲去世了，我独立带领弟妹生活。很快生产队解体，土地承包到了家庭，我于84年随农村的包工头前去青岛干泥瓦工。一次偶然的的机会，我走进了中山路的一家新华书店，这使我大开眼界。看着那么多的高等数学书，使我重新燃起了求学的欲望。年终发了工资，我足足买了40多元（那个时候40多元可以买好多书）的书带回家去了，正式开始了自学的道路。白天种自家的土地，晚上学习。一开始漫无目的，也不知道学了干啥。后来我邻村的一个人考上了武汉大学的研究生班，我的一个初中同学也考上了大连理工大学的数学系，他们给予了我许多的指导，使我明确了考研的路。一开始我以为高等数学就是大学数学系的课程，以后才知道这只是工科数学的教材，而要考数学系的研究生必须学习专门的数学分析，高等代数，常微分方程，解析几何等，而不是这么一个大杂烩。我这

才恍然大悟，怪不得有点简单呢！我感谢我的这位同学，他把自己每个学期的教材都给了我，这使我的数学知识并不比科班出身的人少。我在初中的时候几乎没有学过英语，考高中我们这届学生是第一届要求考英语的，只占30分。仓促之下，学校安排了个老师给我们补习了几个月，别考零分就行！听说研究生要考英语，确实难为了我，因为初中的那几个月的英语早就忘干净了。无奈之下去离家较近的一个高中找了个英语老师教了几次音标，凑合着能读出个音来，就这样开始了英语的自学之路。幸亏研究生不考听力，面试也没有口语，否则就惨了。

1991年我以杭州大学（今浙江大学）数学系第一名、高等代数满分的成绩考上了概率论与数理统计专业的硕士研究生，硕士毕业后去山东工业大学（今山东大学）任教1年。1995年我又考上了浙江大学数学系运筹学与控制论专业的博士生，博士毕业后，为了安排妻子的工作（之前在农村），我去了山东轻工业学院（今齐鲁工业大学）任教。研究生的经历和大部分人一样，没有多少出彩的地方。那个年代也不像现在这样有太多的名利诱惑，写论文并不像现在这样提倡和重视，但是在概率论和随机分析方面踏踏实实地读了几本书，做了相当多的习题，虽然囿于研究的方向，用到的并不是太多，但是对阅读随机控制的大多数论文已经够用了。

我从1985年开始自学到1991年考上研究生，实现了一个初中生的读研梦，其中的酸甜苦辣、忍受的冷嘲热讽只有亲身经历才能体会。

## 二、科研工作

2001年的5月受山东大学数学院程兆林教授的推荐，我得到了一个去台湾清华大学做博士后的机会，之后才开始有了国际视野，也慢慢培养用了英语写作的能力。我的合作教授是大家熟悉的



陈博现 (Chen Bor-Sen) 教授, 陈教授是我做随机  $H_2/H_\infty$  控制的引路人, 使我少走了很多的弯路, 快速进入了学术的前沿。

陈教授推荐我在讨论班报告了两篇经典的论文, 即后面的文献[1]和[2]。读了文献[1]这篇论文使我了解了  $H_2/H_\infty$  控制的要义和核心的技术。2000年以前确定性系统的  $H_2/H_\infty$  控制得到了深入的研究, 但是随机 Ito 系统的相应工作出现较晚, 目前得到广泛引用的是文献[3]这个作品。文献[3]我在讨论班上讲了4次才讲完, 受益匪浅。初等的配方法在[1]–[3]这几个文章中发挥很重要的作用, 由于我博士期间是做随机 LQ 控制的, 对配方法很熟悉, 而陈教授也是对这个方法偏爱。读了文献[1]和[2]后, 我们很快就把[1]的工作推广到了随机 Ito 系统, 这产生了我的第一个国际期刊论文, 见文献[4]。现在看来我们所做的实在不是一个平凡的推广! 困难在于用于证明[1]的核心引理 2.2 所用的两点边值 (two-point boundary value) 方法至少现在看来无法推广到随机系统 (这可能要涉及到复杂的前向–倒向随机微分方程理论)。幸运的是, 不定随机 LQ 适定性的结论刚刚在 2000 年得到, 正好为我们所用, 真乃 “水到渠成, 瓜熟蒂落” 也。[4] 的贡献在于把随机  $H_2/H_\infty$  控制看成一

个二人非零和的 Nash 博弈问题, 因此我们的结论对随机博弈论也是有贡献的。[4] 自发表以来得到了较多的引用, 被称为 “very elegant in theory”, 见 Automatica, 45, page 1758, 2009。

掌握了[2]和[3]的方法后, 我们尝试做非线性随机  $H_\infty$  控制, 即将[3]推广到非线性、将[2]做到随机 Ito 系统, 这就产生了文献[5]。我们的论文 [5] 主要基于随机耗散

性理论、配方技术和随机动态规划。我们得到了系统耗散的一个充分必要条件等价于得到的三个方程 ([5] 的方程 (7)–(9)) 有解。非线性系统的配方确实很伤脑筋, 试凑多日, 终于得到了  $H_\infty$  控制所对应的二阶非线性 Hamilton–Jacobi 方程。后来我们在[6]中得到了一个有用的配方恒等式 (见该文的方程 (16), 假设  $A^{-1}$  存在, 是对称的):

$$\begin{aligned} & x' A x + x' b + b' x \\ & = (x + A^{-1} b)' A (x + A^{-1} b) - b' A^{-1} b \end{aligned}$$

有了上面的恒等式, 现在再来配方就简单多了。[5] 被汤森路透 (Thomson Reuters) 选为有影响的前沿论文 (a featured fast-moving front paper) 和数学领域的高引用率论文 (most cited paper), 并为此接受了科学观察的专访, 见 <http://sciencewatch.com/dr/fmf/2010/10sepfmf/10sepfmfZhan/>

国际随机控制领域的著名学者 V. A. Ugrinovskii 在其综述文章 “Stochastic problem of absolute stability, Automation and Remote Control, 67 (11), pp. 1811–1846, 2006” 中用一页多的篇幅给予详细介绍和高评价, 认为[5]的工作使

Yakubovich 频域定理得到了一个新的推动力，并称我们在[5]中所得到的方程(7)–(9)为非线性的Lure方程，这真是我没有想到的。身在此山而不识庐山真面目啊。

在[5]的基础上陈教授建议我们合写一个非线性 $H_\infty$ 滤波的文章，也就是后面的论文[7]。一开始我很不情愿，因为[5]已经给出了一个非线性的随机有界实引理，做个滤波难度不大。但是陈教授感觉对信号处理很有意义，我们在很短的时间就完成了[7]，没想到[7]的出版比[5]还快了一年多。在这之前非线性Ito系统的 $H_\infty$ 滤波确实工作不多，加之我们采用的滤波器形式较为一般，[7]得到了国内外许多学者的引用和高评价。例如，IEEE Fellow、英国布鲁奈尔大学王子栋教授在“Automatica, 44, pp.1268–1277, 2008”中认为“由Brown运动描述的噪声/干扰滤波问题被文献[7]不同寻常地解决了”(“Another important type of noises/disturbances described by Brownian motions (or Wiener processes) has seldom been addressed for the filtering problems (Zhang, et al., 2005)”)。[7]也许是我所有论文中他引最多的一篇，这点也是出乎我的预料之外，“无心插柳柳成荫”，多亏陈教授督促我合写了这个文章。

我和陈教授除了在随机 $H_\infty$ 合作外，在随机系统的谱分析方面也做出了有意义的工作，给出了随机定常系统均方稳定性的特征值(算子谱)刻画、区域镇定和精确能观性的PBH判据等，给出了广义代数Riccati方程强解(strong solution)的正确定义，纠正了以往文献的错误。我们熟知Lyapunov方法用于判别稳定性是极为方便的，但是这种方法却无法直观地告诉你系统的收敛速度。而定常系统 $dx=Axd$ 通过 $A$ 的特征值在左半复平面上的分布情况可以直观地得到系统的收敛快慢，比如说，特征值越靠近虚轴收敛越慢，越靠

左边收敛越快。通过与工程技术人员的交流可以知道他们其实更关心收敛速度。对于一个可镇定的控制系统，通过选择反馈增益矩阵，可以使闭环系统达到理想的收敛速度，这也许就是极点配置的重要意义了。[8]通过引进一个有限维的广义Lyapunov算子，通过谱分析的方法可以在随机控制领域的诸多方面建立与现代控制理论相平行的结论。[8]的定理2, 4, 5和6在我看来都是精致的证明。定理2的必要性证明寥寥几行，我竟然耗费了几年时间，现在看来真是一个好的高等代数习题啊！定理4结论简单，易于验证，又是充分必要条件，这种一句话定理是我的最爱！我想平面几何吸引人的一个重要原因也是里面的大部分定理都可以用一句话表达。分析中的Holder不等式，Newton–Leibniz公式又何尝不是这样！Ito公式虽然稍微复杂点，但还是能记住。

[8]的工作被德国学者T. Damm进行了有意义的推广，见Automatica, 43, pp.928–933, 2007，而且我与合作者在[8]的基础上在IEEE TAC上又发表了3篇文章<sup>[9,10,11]</sup>。[9]所提出的一个关于广义代数Riccati方程性质的猜想(Conjecture 4.1)至今尚未解决，我的一个博士生花了很大力气也只是做了一点工作。[10]是一个很有意思的短文，讨论了收敛速度和算子谱分布的关系，证明了二阶矩Lyapunov指数等于算子谱的最大实部。[11]发展了一种H-表示技术，已经被华南理工大邓飞其教授课题组用来解决非线性随机时滞系统的矩稳定性<sup>[12,13]</sup>。看到我们的论文能够在其他学者的工作中发挥作用，我倍感欣慰！

我从2001年的5月8日到2003年的7月28日共在台湾呆了2年3个月的时间，期间一次也没有回大陆，完成了4篇论文<sup>[4,5,7,8]</sup>，我将其视为自己的代表作，因为这4篇论文指引了我最近10年的工作。台湾的2年是我人生中有意义的2年，虽苦犹乐！



### 三、结束语

2015年2月我再以客座教授的身份来到台湾清华大学访学。时光匆匆，恍惚之间，陈教授已经68岁了，而我也已经到了知天命之年，岁月在各自的脸上留下了无情的印记。唯一不变的是陈教授的勤奋一如十几年前我初次见到的那样，这给了我极大的震动。45岁以后，由于环境和年龄的原因，我曾经有2年的消沉期，学习有了懈怠的情绪，多亏了妻子的督促和唠叨才使我没有停下来。她喜欢看学习的样子，这个时候再苦再累她也不要我插手半点。她鼓励我不要为了名和利学习，为健康学习，为兴趣学习，即使将来退休了也还希望我保持学习的习惯。她甚至说当初我在农村那么穷而嫁给我，就是看好我喜欢学习特别还是学数学。陈教授的办公室有一副菜根谭的名句对联，妻子曾经去台湾探亲的时候见到过，非常喜欢。这幅对联的内容是：绳锯木断，水滴

石穿，学道者须加力索；水到渠成，瓜熟蒂落，得道者一任天机。她特意请我们学校艺术学院的一位教授为我书写了一副相同的对联，挂在了我的书房用以激励我的斗志。嗨，有这样的妻子，夫复何求？！为了妻子高兴我要学习，对比陈教授的干劲我更要加紧科研，因为陈教授比我大了18岁，我又怎能从年龄上找偷懒的借口呢？为了年轻时候的梦想要继续干下去，为了把山东科技大学我所带领的随机控制团队做强做大要继续干下去，为了身体的健康要继续干下去，因为沉浸在书本里、数学的推算里，我确实感到快乐！

## 参考文献

- [1] Limebeer D J N, Anderson B D O, and Hendel B. A Nash game approach to mixed  $H_2/H_\infty$  control. IEEE Trans. Automatic Control, 1994, 39, 69–82.
- [2] van der Schaft A J.  $L_2$ -gain analysis of nonlinear systems and nonlinear state feedback  $H_\infty$  control. IEEE Trans. Automatic Control, 1992, 37, 770–784.
- [3] Hinrichsen D and Pritchard A J. Stochastic.  $H_\infty$  SIAM J. Contr. Optim., 1998, 36, 1504–1538.
- [4] Chen B S, Zhang W. Stochastic  $H_2/H_\infty$  control with state-dependent noise. IEEE Trans. Automatic Control, 2004, 49(1), 45–57.
- [5] Zhang W, Chen B S. State feedback  $H_\infty$  control for a class of nonlinear stochastic systems. SIAM J. Control and Optimization, 2006, 44(6), 1973–1991.
- [6] Zhang W, Chen B S, Tang H, Sheng L, Gao M. Some Remarks on General Nonlinear Stochastic  $H_\infty$  Control with State, Control and Disturbance-dependent Noise, IEEE Trans. Automatic Control, 2014, 59(1), 237–242.
- [7] Zhang W, Chen B S, Tseng C S. Robust  $H_\infty$  filtering for nonlinear stochastic systems. IEEE Trans. Signal Processing, 2005, 53(2), 289–298.
- [8] Zhang W, Chen B S. On stabilizability and exact observability of stochastic systems with their applications. Automatica, 2004, 40(1), 87–94.
- [9] Zhang W, Zhang H, Chen B S. Generalized Lyapunov equation approach to state-dependent stochastic stabilization/ detectability criterion. IEEE Trans. Automatic Control, 2008, 53(7), 1630–1642.
- [10] Zhang W, Xie L. Interval stability and stabilization of linear stochastic systems, IEEE Trans. Automatic Control, 2009, 54(4), 810–815.
- [11] Zhang W, Chen B S. H-representation and applications to generalized Lyapunov equations and linear stochastic systems, IEEE Trans. Automatic Control. 2012, 57(12), 3009–3022.
- [12] Zhao X, Deng F. Moment stability of nonlinear discrete stochastic systems with time-delays based on H-representation technique. Automatica, 2014, 50(2), 530–536.
- [13] Zhao X, Deng F. Moment stability of nonlinear stochastic systems with time-delays based on H-representation technique, IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(3), 814–819.