

纪念关先生，在应用中发展控制论

袁著祉

(南开大学计算机与系统科学系·天津, 300071)

摘要: 纪念关肇直先生，以实例说明下述三个观点：实践是发展控制理论的动力、理工结合大力发展控制理论及控制工作者要积极为国民经济服务。

关键词: 关肇直；控制理论与应用；自校正控制；自适应控制；预测控制；智能控制

In Memory of Professor Kwan, Develop Control Theory in Practice

Yuan Zhuzhi

(Department of Computer and System Science, Nankai University · Tianjin, 300071, P. R. China)

Abstract: In memory of professor Guan Zhaozhi, use real examples to demonstrate the following three viewpoints: The practice is the power to prompt the progresses of control theory, The great develop of control theory need the combination of science and engineering, The control scholars should serve for the national economy.

Key words: Kwan C C; control theory and application; self-tuning control; adaptive control; predictive control; intelligent control

1 引言

关肇直先生去世已经 10 多年了，可是他的音容笑貌一直还留在我们的脑海中，我还清楚地记得关先生一再强调的下面的几个观点：

- 实践是发展控制理论的动力；
- 理工结合大力发展控制理论；
- 控制工作者要积极为国民经济服务。

为了推动我国控制理论研究的发展，关先生排除种种困难在中国科学院成立了系统科学研究所。多年来关先生在全国各地做过各种大规模的演讲和小规模的座谈，他一方面精辟地讲述控制理论的新进展和新方向，使更多的人进入控制论的研究行列，一方面大力提倡把控制理论应用到实际中去，不要局限于理论，要向工程界学习，学会从实践中抽取控制理论问题并加以解决，才能不断地有所创新，在国际控制界做出我们的贡献。尤其使人难忘的是他在多种场合一直强调“我国控制界一定要大团结，形成浩浩荡荡的队伍，只有团结我们的控制理论研究事业才能发展壮大”。为了改变我国经济的落后面貌，他常常说控制工作者要为国民经济服务。

关先生是这样说的，也是这样做的。根据我耳闻目睹的一些事情就可以看出关先生为了我国的自动化事业真是鞠躬尽瘁、死而后已。在 70 年代末期，他在天津的一所与国防有关的研究所进行合作

研究工作时，虽然工作已经很繁忙了，还是应我们的要求为天津的广大听众做了控制理论十大进展的学术报告，由于过度疲劳回京时崴伤了脚，由于马上去贵州，关先生还是带伤赴贵州国防试验基地进行合作研究了；80 年代初关先生已经患病仍然带病到哈尔滨参加了暑期讨论会，和大家一起讨论了控制理论的发展方向，回京不久就卧床不起，在病中还非常关心我国自动控制的发展大事。关先生的这种全心全意为了发展我国控制事业及大力奖掖后人的精神，成了我们的学习榜样。

在关先生和其他前辈科学家的指导下，通过我国自动控制工作者的努力工作，我国的自动化事业有了很大的发展，理论上做出了很多创造性的工作，应用上几乎涉及国民经济的各个行业，今年夏天在北京举办的第十四届 IFAC 世界大会，在一定意义上显示了我国自动控制界在世界上的地位。

下面介绍我的一些体会。

2 实践是发展控制理论的动力

1970 年我们受关先生的影响从数学转向控制论，当时在向关先生请教时，他建议我们把民用工业作为应用的重点；不久，我们在北京找到了一家化工厂，工厂为了进一步提高产品的质量和产量，要求在原有的从日本引进的数字 PID 调节器基础上

进行改进. 该厂的主要设备之一是醋酸乙烯合成反应器, 用 PID 控制效果不理想, 最初我们设计了最优控制器, 控制目标是醋酸乙烯的收率最大, 由于该装置主、副反应很多, 要使用最优控制器就必须有已知的化学反应的状态方程, 用化工动力学机理建立数学模型需要十几个非线性的偏微分方程, 这是很困难的, 即使有了这些数学模型, 其中的参数也会随着设备的老化和催化剂活性的衰减发生很大的变化, 况且反应器还有一些未知干扰. 因此, 采用经典的最优控制器在实际中是不可行的. 于是, 我们通过广泛的调研, 在国际刚出现的自校正控制器上进行改造, 推导出多输入、多输出自校正控制器, 在反应器上调试后获得了成功, 工厂正式在生产中使用, 比日本引进的调节器有更优良的效果^[1], 得到了天津市科技进步二等奖, 关先生也倍加推崇. 在 1980 年瑞典著名学者 Åström K J 来北京讲学时, 关先生特地邀请他到该化工厂参观, 该项目受到他和陪同参观的广大中国学者的很好评价.

在这个项目成功的鼓舞下, 我们又先后承接了水泥窑、发酵罐和扩散炉等实际工程项目, 在设计控制器时, 发现自校正控制器的鲁棒性不够强, 于是又研制了广义预测自校正控制器 (GPC), 在造纸机纸张定量和水分含量控制的实际项目中, 成功的使用了 GPC, 克服了纸浆浓度和水蒸气压力的干扰, 使纸张的定量和水分含量达到了理想的控制效果^[2], 该项目获得了云南省科技进步二等奖.

接着, 我们在一台钢锭加热炉和两台十吨工业锅炉上设计了 GPC 系统, 对实际工业过程受到燃料波动以及其他的变化有很强的抑制能力, 在生产中达到了满意的控制效果^[3], 获得国家教委科技进步三等奖.

我们在大量的实际应用中发现广义预测自校正控制器具有很好的稳定性和鲁棒性, 但是 GPC 的稳定性和鲁棒性却一直没有得到理论上的证明, 从实践中的经验使我们产生了一个直觉, “GPC 的稳定性和鲁棒性是能被从理论上证明的”. 终于在 1989 年我们从理论上证明了 GPC 的稳定性和收敛性^[4], 接着又进一步证明了 GPC 的鲁棒性^[5], 由此可见实践可以推动控制理论的发展.

在研究两台 20 吨工业锅炉控制系统时, 我们又提出了 PID+GPC 新型控制策略^[6], 使广义预测自校正控制器具有了 PID 的特性, 进一步增强了 GPC 的鲁棒性, 在实际运行中锅炉的控制效果很好, 六年多的运行显示了新型控制器的可靠性.

在工业现场中大部分系统要求实时控制, 但是 GPC 计算量比较大, 在实时应用时存在“时间困难”问题, 为此我们研制了递推 GPC^[7]、不解丢番图方程的简化 GPC^[8] 及并行 GPC^[9], 为适合各种不同的工业对象又提出了约束 GPC^[10]、加权 GPC^[11]、极点配置 GPC^[12]、LQG-GPC^[13] 和 σ -1-GPC^[14] 等方法.

为了控制“自由号”空间站的姿态, 与美国学者一起设计了状态空间自校正控制器, 解决了控制器的发散困难, 被美国国家宇航局 (NASA) 列为优选方案^[15].

随着工业控制的高精度和高可靠性的要求, 对一些复杂系统用传统的控制器很难达到实际的需要, 近些年来我们把智能化的方法和传统的最优控制方法结合起来, 提出了神经元 GPC^[16]、模糊 GPC^[17] 和专家 GPC^[18] 等新型智能预测控制策略. 其中的神经元 GPC 是我们在一个重点科技攻关项目中提出的, 这条涤纶片基拉膜生产线是从国外引进的, 存在着严重的非线性现象, 我们用 GPC 控制薄膜的纵向厚度, 用神经网络控制薄膜的横向厚度 (剖面), 获得了成功, 充分显示了智能控制加 GPC 控制复杂系统的优越性^[19].

我们的体验说明了关先生所一贯倡导的“实践是发展控制理论的动力”论断的正确性.

3 理工结合大力发展控制论

关先生历来提倡“理工结合起来发展控制论”, 我理解这里有两层含义, 第一层希望理科出身的和工科出身的互相结合, 共同发展控制理论, 更广一层希望控制理论工作者与工程技术人员合作, 一起应用和发展控制论. 为此关先生组织和支持在全国举办了很多讲座和研讨班, 为大力普及现代控制理论和推广控制论的应用作出了突出贡献.

在 70 年代末期到 80 年代中期, 我积极响应关先生的号召, 参加了十多个讲座和研讨会, 在推广现代控制论的同时向工科出身的学者和工程技术人员学习了自动控制实际应用的经验, 并进一步与他们合作完成了很多实际控制工程项目.

我们与昆明工学院的老师一起完成了大理造纸厂纸张定量与水分含量的自适应控制系统, 取得了很好的效果, 如前所述已经获奖.

我们与延边大学的老师合作为延吉制药厂的发酵罐设计了自校正控制方案, 在调试中互相讨论, 最后成功运行在生产中. 已获得了吉林省的奖励.

和重庆大学的师生合作设计了扩散炉自校正控制器, 获得了理想的实验结果。

上述三例都是在举办讲座过程中, 通过课下详细交流达到相互了解, 进一步实现合作的。还有一些实际课题是在一些讲座中认识工程技术人员, 直接达成合作而完成的, 如工业锅炉和钢锭加热炉的自适应控制系统与大型化工企业优化调度系统等。

4 控制工作者要积极为国民经济服务

关先生在 70 年代初, 曾建议我们把应用的重点放在民用工业上。20 多年来, 我们始终在工业过程中进行控制论的应用, 先后涉及到化工、水泥、造纸、制药、冶金、电力和感光材料等行业的十几个工厂的几十个工业装置。这些装置都是工厂的重要设备, 而且很复杂, 大多具有非线性、多变量耦合、大时滞和大干扰等特性, 用传统的控制方法达不到满意的控制效果。我们克服了各种困难, 设计了不同类型的新型控制器并在生产装置中运行, 为工厂带来很大的经济效益。

我们为一个大型氯碱化工企业研制了全厂氯气和水蒸气优化调度系统, 节省了大量的原材料和能源, 提高了产品产量和质量, 可以增收几千万元, 已经通过化工部的鉴定。

为一家制药厂两台 20 吨工业锅炉研制了智能 PID 预测控制系统, 稳定了蒸汽的压力, 使后续车间发酵罐灭菌时的蒸汽达到了所需的高温, 消灭了发酵罐因消毒不严而造成的染菌“倒罐”现象, 保证了高产、优质, 还节煤和节电达几百万元, 已经正常运行了 6 年多。

有一家感光材料公司在 80 年代初从国外引进了一套生产涤纶片基的拉膜生产线, 当时由于缺少资金只引进了生产设备和计算机硬件, 而没有购买数学模型和相应的软件, 十多年来不能正常生产, 到九十年代中期欠银行贷款达二亿五千万人民币, 沉重的债务包袱压在企业身上, 为此企业四处寻求合作者。美国柯达公司曾经插手改造工程, 后来由于难度太大, 柯达公司不干了; 我们应工厂要求和其他工程技术人员合作承接了这项重点科技攻关任务, 把十多年前的落后的计算机更换为新的计算机网络, 在此基础上我们设计了 GPC 与神经网络控制器并研制了配套软件, 使涤纶薄膜的纵向厚度和剖面控制精度达到了理想的范围, 受到了工厂的好评, 该项目完成后, 可以把 2.5 亿元沉淀的资金盘活, 使停产十多年的生产线运行起来。

我们的工作曾获得国家教委科技进步一等奖和

光华基金一等奖。

5 结束语

控制论属于应用学科, 控制理论的产生和发展离不开应用, 此外, 作为应用学科, 控制理论的归宿也应该是应用, 只有通过应用才能最终检验控制理论的正确性, 也只有通过应用才能为国民经济带来好处。我们近三十年的实践经验说明了这一点, 这也是关肇直先生对我们指导的结果, 纪念关先生, 要更好的在实践中发展控制论, 创造新的控制技术。

参考文献

- 1 Yuan Z Z. et al. Application of STR to Chemical & Cement Industry. Preprints of the IFAC 8th Triennial World Congress, XX II, 1981, (15):15-20
- 2 缪永康等. 造纸机不同时滞多变量自校正控制器. 自动化学报, 1989, 15 (5): 400-407
- 3 陈增强等. 工业锅炉的加权预测自校正控制. 自动化学报, 1993, 13 (1):46-53
- 4 袁著祉, 陈增强. 综合广义预测自校正控制器的稳定性和随机收敛性. 中国科学 (A 辑), 1989, 33 (11): 1197-1207
- 5 陈增强等. On the robustness of a generalized predictive controller. Applied Mathematics Journal of Universitys, 1995, 10(4): 449-456
- 6 陈增强等. 预测 -PID 串级控制及其在锅炉液位系统中的应用. 控制与决策, 1994, 9(5): 379-382
- 7 袁著祉等. 递推综合广义预测自校正控制器. 自动化学报, 1989, 15(4): 348-351
- 8 袁著祉等. 新型随机广义预测自校正控制器. 自动化学报, 1992, 18(3): 282-289
- 9 胡海波等. 并行广义预测自校正控制器. 系统工程与电子技术, 1994, 16 (1): 73-80
- 10 陈增强等. 约束后移控制序列的 PI 型预测控制器在水轮机调速控制中的仿真. 水力发电学报, 1997, (3):79-83
- 11 李少远等. 非最小相位系统的加权预测控制. 控制理论与应用, 1998, 15(2): 295-298
- 12 陈增强等. 多变量极点配置控制器的矩阵方程求解. 数学物理学报, 1992, 12(增刊): 30-32
- 13 王维民等. 基于预报器的综合 LQG 自校正控制器. 控制理论与应用, 1991, 8(4): 393-399
- 14 袁著祉等. 一种新型的鲁棒广义预测自校正控制器. 信息与控制, 1991, 20(6):1-10
- 15 Yuan Z Z. et al. Self-tuning control of attitude and momentum management for the space station. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1992, 15(1): 17-27
- 16 陈增强等. 基于 Tank-Hopfield 神经网络的有约束多变量广义预测控制器. 控制理论与应用, 1998, 15(6): 847-852
- 17 李少远等. 基于模糊推理和广义预测的组合控制. 南开大学学报, 1997, 30(2): 20-24
- 18 陈增强等. 工业锅炉燃烧过程实时控制专家系统. 模式识别与人工智能, 1994, 7(2): 165-170
- 19 贺江峰等. 涤纶片基拉膜生产线控制系统设计与实现. 中国控制会议论文集, 庐山, 1997, 1095-1098