

迈向二十一世纪的中国控制理论

陈翰馥 郭雷

(中国科学院系统科学研究所·北京, 100080)

摘要: 本文简单回顾了现代控制理论在中国的起步, 简述了近 30 年来中国在控制理论方面所取得的若干进展, 继而本文分析了理论和实际的差距, 并指出中国控制科学工作者在迈向二十一世纪时所面临的挑战。

关键词: 控制理论; 控制应用; 复杂控制系统

China's Control Theory Towards 21st Century

Chen Han-Fu Guo Lei

(Institute of Systems Science, Chinese Academy of Sciences · Beijing 100080, P. R. China)

Abstract: After briefly reviewing the initial step of development of the modern control theory in China, the paper summarized some achievements on control theory made in China over the past three decades. Then the paper analysed the gap between theory and practice and pointed out the challenges to Chinese control scientists facing the 21st century.

Key words: control theory; control application; complex control system

1 现代控制理论在中国的起步

原国务委员、中科院党组书记张劲夫同志在“请历史记住他们”这篇关于中国科学院与“两弹一星”的著名回忆中^[1], 在“应该永远记住这段历史”这一小标题下列举了为我国“两弹一星”做出贡献的中国科学院研究所的科学家, 其中有科学院的数学家关肇直教授, 这使我们从一个侧面看到关先生从基础数学家走向现代控制理论专家的足迹。

自动控制理论在 60 年代以前通常的研究对象是由线性、定常微分方程所描述的系统, 所用控制器不外乎比例放大器、积分器及微分器, 简称为 PID 调节器, 用起来简单、方便, 被工程技术人员广为接受。这种理论在原苏联称为自动调节原理, 在美国称为工程控制论。为我国“两弹一星”做出过杰出贡献的钱学森教授的英文专著《工程控制论》^[2]曾先后被译成多国文字, 在国际上产生过重要影响。从 50 年代末起, 航天、航空等高科技的发展, 对自动控制提出了精确、快速、适时等要求, 计算机的发展也为实现这样的控制提供了可能。与此相应, 自动控制理论也从经典自动调节原理发展到以状态空间描述为特征的“现代控制理论”。控制理论界通常把 Понтрягин 的极大值原理、Bellman 的动态规划以及 Kalman 滤波和他的线性系统基本理论的形成,

看成是现代控制理论的里程碑。

对我国“两弹一星”事业负有重要责任的钱学森教授看到了国际上的这种发展趋势, 在他的建议下, 关肇直教授和当时的国防科委五院合作, 于 1962 年在中国科学院数学研究所创建了国内第一个“现代控制理论研究室”, 人员除来自数学所外, 还有五院参加协作。由关肇直教授任室主任, 宋健教授兼任副主任。在我国对现代控制理论的研究由此起步。当时的研究集中在分布参数控制系统、确定性控制系统及随机控制系统三方面。从 1962 年建立控制理论研究室到 1982 年, 关先生在他生命的最后 20 年中, 全身心地投入到我国控制理论事业的发展。他查阅大量文献, 刻苦钻研, 不仅指导学生, 并且带动年轻的研究人员, 经常深入实际单位了解具体问题, 多次作系统讲座以及不计其数的学术报告。关先生不知疲倦地工作, 他的渊博的学识和诲人不倦的精神, 影响和带动了一代中国控制理论学人, 并使现代控制理论在我国工程技术人员中得到很大的普及。在中国自动化界无人不晓, 现代控制理论在我国的起步并奠定基础是和关肇直的名字分不开的。

2 控制理论在中国的若干进展

以状态空间形式发展起来的现代控制理论, 在

60年代甚至70年代的相当长的一段时间内,一直集中研究线性系统的控制.但到了70年代末,线性控制理论已臻于成熟,用不同方法总结的专著也相继出版^[3,4,5].但客观世界的实际问题要复杂得多,远非都能用线性系统来描述.于是控制界的研究人员就把眼光转到具有不同类型的复杂性系统的控制问题,例如,从有穷维系统转向无穷维系统,从确定性转向具有不确定性及随机性的系统,从线性系统转向非线性系统,从可用微分方程描述的系统转向离散事件动态系统等.

我国学者对具有各种复杂性系统的控制做了大量研究,并有不少具有国际影响的工作,包括一些在国际上得到高度评价的工作.在分布参数控制系统方面,例如关肇直和宋健等对以导弹为背景的细长体的弹性振动控制系统的极点配置和反馈镇定研究^[6,7];宋健和于景元等对人口系统的临界稳定生育率的研究和人口预测^[8];李训经和雍炯敏等对无穷维系统最优控制的工作^[9];姚鹏飞用Riemann几何方法解决非均匀系统边界精确能控性及他和冯德兴对弹性振动平方根阻尼算子的刻画^[10];周鸿兴^[11]和孙顺华对无穷维系统能控性以及黄发伦对指数稳定性的研究^[12]等.在随机系统方面,例如彭实戈对扩散项受到控制影响的一般情形下的随机极大值原理以及受此启发而进一步研究的倒向随机微分方程^[13];陈翰馥对随机系统估计和控制的研究^[14];陈翰馥和郭雷给出的使参数估计和性能指标同时达到最优的适应控制^[15];郭雷解决自校正调节器的收敛性这一适应控制中近20年的难题;郭雷对时变参数估计理论的研究^[16];陈翰馥等对随机逼近型优化算法的分析^[17];冯纯伯等关于偏差补偿最小二乘辨识方法的研究^[18].在不确定性和非线性系统方面,例如黄琳等把判别多项式稳定性的Харитонов定理和棱边定理推广到更一般的边界定理^[19];高为炳对变结构控制中“趋近律方法”的研究^[20];张嗣瀛等关于具有对称相似性非线性系统的研究^[21];程代展关于非线性系统的几何理论与方法研究^[22]等.

我们以上简要地列举了国内学者对较有穷维确定性线性系统更为复杂的系统控制所做的某些理论工作,较全面的综述可见^[23].由于篇幅和我们的材料所限,对做出重要理论工作而没有被提到的作者,我们在此表示歉意.

3 理论和现实的差距

理论和应用之间的“鸿沟”,是古今中外在科学

技术领域普遍存在的问题.对控制理论这门典型的技术科学来讲,这一问题也很明显,这是由这门学科高度的交叉性、广泛的应用性及所需数学工具的深刻性所决定的.

如果把“无穷维”、“随机性”、“不确定性”、“非线性”、“离散事件性”等看成是系统复杂性的一种形式,那么从上面我们可以看到,我国学者对具有部分复杂性的系统的控制理论,做了许多研究,并有很多重要贡献.这是提高国家现代化水平的重要理论储备和支柱.系统和控制理论的应用会产生很大的经济效益.以工业企业为例,如果把生产过程在线优化、生产调度和经营决策作为一个综合体来考虑,那么这是一个具有各种复杂性的控制系统.把全部生产过程作为互相紧密联系的一个复杂整体进行综合优化,被公认为是节能降耗、缩短产品开发周期、提高产品质量的一个高效生产模式.据统计,实现综合自动化后,库存量可减少30%,生产周期可缩短30%,产量可增加10%,管理效益可提高20%,从而带来重大的经济效益.

综合自动化的程度和效益与单元过程(或装置)的自动控制水平密切相关.在国内外工程技术系统中,据统计,目前绝大多数控制回路,仍采用传统的PID调节器,而很少采用现代控制理论提供的控制方案和算法.我们看到两者之间存在着不可思议的差距:一方面是采用先进的复杂系统控制理论可能带来的巨大经济效益,而另一方面是相当多的工程技术系统没有用上控制理论专家冥思苦想研究出来的理论.有人甚至说“PID万岁!”,似乎现代控制理论用处不大.

控制理论作为自动控制这门技术科学的理论基础,它理所当然应能指导工程技术领域中新控制器的设计和实现.但现在一方面公认现代控制理论的应用可创造出较大的经济效益,另一方面许多工业企业不愿放弃传统的PID.这“毛病”究竟出在哪里?是理论工作不成熟、不可靠或太繁琐不易实现?是工程技术人员不熟悉新理论、比较保守?在下一节我们来初步分析这些问题.

4 对控制理论工作者的挑战

由上我们看到,控制理论和实际应用存在一定差距.下面我们从理论研究及工程实际两个方面来分析产生这种差距的原因,从而看到我国控制理论工作者面临着巨大挑战.

首先,从控制理论研究的角度看,以往我们对

复杂系统控制的研究,所注重的系统“复杂性”往往只是单一的复杂性,如带不确定因素(即复杂性)的线性系统的鲁棒控制,参数未知(复杂性)时线性系统的适应控制,非线性(复杂性)系统控制,线性分布参数(复杂性)系统控制,随机(复杂性)系统控制等等。这里的“复杂性”是和有穷维确定性线性系统比较而言的。当然,也有一些重要方向涉及双重或多重的复杂系统控制,但研究起来就要困难得多,例如随机非线性系统的适应控制,随机非线性分布参数系统的控制设计等。但在客观世界中我们所要处理的实际系统往往是极其复杂的,很难用只具单一(或部分)复杂性的系统来描述,而需要用有综合复杂性的系统。所以我们说现有的理论确实不够好,这确实是造成差距的一个重要原因。研究具有多种复杂性系统的控制理论,既需熟悉它的工程背景,又要用多种数学工具并结合运用计算机才有可能获得成功,例如要用的数学工具包括:非线性分析、微分几何、微分代数、泛函分析及偏微分方程、随机过程及概率统计等。要掌握从工程、计算机及这么多门的数学工具来研究具有综合复杂性的控制系统,是21世纪对控制理论工作者提出的巨大挑战。

第二, PID 调节器由于不依赖具体模型,从而简单易行并且灵活性较大,而根据现有控制理论来设计的控制器较为复杂。这是造成差距的另一个原因。PID 调节器的主要局限在于不能有效地对付多变量耦合、时变非线性、大时滞等复杂系统,而这些系统又是在实际中普遍存在的。研究简单、可靠、易于实现的,比 PID 调节器性能更好的控制器,是21世纪对控制理论工作者的另一个巨大挑战。

第三,造成上述“差距”的其它原因还包括习惯势力和现有工业基础。我国有一批优秀的控制理论应用工作者,他们和工程技术人员相结合已用现代控制理论改造了相当一批工程技术系统中的 PID 调节器,重新设计了借助于计算机的控制系统,取得了很好的经济效益,例如,柴天佑和孙优贤等对工业过程的先进控制方法的应用;袁璞的对催化裂化装置的先进控制和优化方法;韩志刚提出的“无模型自适应控制器”;卢强等对电力系统设计的非线性励磁控制器;孙德敏等对丙烯晴装置的自适应在线优化;杨志远等对机炉协调电力系统的自适应控制方法等,详见 [23]。

我们相信,用控制理论现有成就,控制理论应用工作者与工程技术人员相结合,在改造我们传统

工业中,会起更重要作用,取得更重大经济效益。并且随着技术进步和教育水平的提高,计算机将越来越被更多的技术人员和工人所接受和使用,用新的控制理论来控制实际系统必将成为普遍的事实。在传统产业的现代化改造中,我们控制理论工作者大有可为。

5 结束语

在关肇直先生八十诞辰之际,当我们缅怀老一辈科学家对我国现代控制理论的巨大贡献,展望中国在下一世纪应有和 大国地位及悠久文明相适应的经济实力和科学技术水平,而自动控制又是建设现代强国的关键科学技术时,倍感我国的控制理论科学工作者的责任重大。我们应该研究更能适合实际系统的控制理论,也就是研究包含多种复杂性的控制系统理论,要根据先进的理论成果,研究简单可靠便于掌握的实施方案,控制设计及优化算法,还要应用现有的理论成果,结合工程技术实际,为改造我国的传统产业并为发展高新技术产业,做出自己的贡献。在新的世纪中,我国的控制理论和应用工作者,任务艰巨,大有可为!

参考文献

- 1 张劲夫. 请历史记住他们一关于中国科学院与“两弹一星”的回忆. 科技日报及全国各大报纸, 1999年5月6日
- 2 Tsien H S. Engineering Cybernetics. McGraw Book Company, 1955
- 3 Wonham W M. Linear Multivariable Control. New York: Springer-Verlag, 1974
- 4 Volowich W A. Linear Multivariable Systems. New York: Springer-Verlag, 1974
- 5 MacFarlane A. Dynamic System Models. Harrap, London, 1970
- 6 王康宁, 关肇直. 弹性振动的镇定问题. 中国科学, 1974, 17(4): 335-350; 1976, 19(4): 323-346
- 7 Song J. and Yu J Y. On the theory of distributed parameter systems with ordinary feedback controller. Scientia Sinica, 1975, 18: 281-310
- 8 Song J. and Yu J Y. Population System Control. Berlin: Springer-Verlag; Beijing: Chinese Academic Publishers, 1988
- 9 Li X J. and Yong J M. Optimal Control Theory for Infinite Dimensional Systems. Boston: Birkhauser, 1995
- 10 Yao P F and Feng D X. Structure for non negative square roots of unbounded nonnegative self-adjoint operators. Quaterly Journal of Applied Mathematics, 1996, 65(3): 457-473
- 11 Zhou H X. Controllability properties of linear and semilinear abstract control systems. SIAM J. Control and Opti-

- mization, 1984, 22(3): 405 - 422
- 12 Huang F L. Characteristic conditions for exponential stability of linear dynamical systems in Hilbert spaces. *Ann. Of Diff. Eqs.*, 1985, 1(1): 43 - 55
- 13 Peng S G. Backward stochastic differential equation and its application in optimal control. *Appl. Math. & Optim.*, 1993, 27:125-144
- 14 Chen H F. *Recursive Estimation and Control for Stochastic Systems*. New York:Wiley, 1985
- 15 Chen H F. and Guo L. *Identification and Stochastic Adaptive Control*, Boston: Birkhauser, 1991
- 16 郭雷. 时变随机系统: 稳定性、估计与控制. 长春: 吉林科技出版社, 1993
- 17 陈翰馥, 朱允民. 随机逼近. 上海: 上海科学技术出版社, 1995
- 18 Feng C B. Zheng W X. and Liu B. 系统参数估计的偏差补偿最小二乘方法. *控制与决策*, 1986, 1(1): 2-8
- 19 Huang L and Wang L. Value mapping and parameterization approach to system robustness analysis. *Science in China*, 1991, 34(8): 839-849
- 20 高为炳. 变结构控制理论基础. 北京: 中国科学技术出版社, 1990
- 21 张嗣瀛. 复杂系统的对称性及相似性结构研究. *控制理论与应用*, 1994, 11(2): 231-237
- 22 程代展. 非线性系统的几何理论. 北京: 科学出版社, 1988
- 23 Guo L, Huang L and Jin Y H. Some recent advances of automatic control in China. *Preprints of the 14th IFAC World Congress, Plenary and Index Volume, Beijing, July, 1999*