

从 ACC 看控制理论中几个前沿课题的新动向

张钟俊 韩正之

(自动控制系)

摘要 本文介绍了近年来在自适应控制、鲁棒控制、智能控制和非线性控制这四个专题领域中的研究动向及其特点。

关键词 控制理论, 自适应控制, 鲁棒控制, 智能控制, 非线性控制

0 引言

1991年3月,在美国波士顿举行了一年一度的全美控制年会(American Control Conference 简称 ACC)。该会议由美国航空航天学会、美国化学工程学会等7个学术团体联合发起,并被认为是全美控制界的“最高层次大会”。如今出席 ACC 的已经不只是美国学者,它已经成为国际控制界的盛会。

概括地说,1991年 ACC 会议有着下列三方面的特点:

首先,会上提出的论文研究课题比较集中。本届 ACC 共收到 460 篇论文,其中 60% 以上的文章围绕了自适应控制、鲁棒控制、智能控制和非线性控制 4 个主题,而这 4 个主题正是国际自控联(IFAC)在 1990 年抽样调查中被证实是最受关注的课题。从这一点可以说,1991 年的 ACC 反映了当代控制理论研究的主流。

其次,控制理论各个领域的交叉渗透十分突出,而且这种交叉已经体现在前沿课题上,一批研究非线性鲁棒控制、非线性自适应控制、自适应鲁棒控制等的交叉课题的论文,反映了控制理论向纵深发展的趋势。

第三,理论转化到应用的间隔时间越来越短。例如,在过程控制中已经用上鲁棒自适应律和神经元网控制,甚至 1989 年才建立的非线性系统几乎干扰解耦理论;在机器人控制中,也使用了上述控制方法或理论。理论很快地应用到实际,一方面能给理论研究以新课题,另一方面也促进了经济发展。

1 自适应控制

从自适应系统由于参数摄动而失稳的例子提出之后,自适应系统的鲁棒性问题就成为这个领域的主题。1991 年的 ACC 提出了多种增强自适应系统鲁棒性的措施。但是这些措施都存在局限性。概括起来这些措施可以分成两类:一类是充分利用先验知识,尽量地对包括

本文 1991 年 11 月 30 日收到。

干扰、未建模动态等不确定因素数量化,建立近似模型^[1]。本届 ACC 上提出的量化方案主要是用多项式或有理函数去逼近,得出的是线性模型,然后利用这个估计出的模型参与自适应控制律的设计。上述措施还只限于单输入单输出系统。另一类是先确定一个具有鲁棒性的参数集,然后利用投影关系在那个鲁棒集中确定控制律的参数。与这种方法具有相同功效的是试图减弱鲁棒性参数的要求,这相当于增大鲁棒参数集,最好将已建立的控制律嵌入进去^[2]。

近年来,自适应控制和非线性系统理论的结合显得相当突出。这种结合主要表现在两个方面:一方面是提出了多种非线性的自适应律,例如广义模型控制、线性化的自适应反馈。但是目前的非线性自适应控制律主要还是针对可以反馈线性化的系统,从本质上讲还是可以纳入线性自适应控制^[3];另一方面是利用神经网络进行自适应控制律设计。鉴于神经元的记忆功能,利用它能提高自适应控制的效果是容易看到的。但是目前提出的用于自适应控制的神经网络构造还很复杂,其中计算量也大,因而离实时控制尚有距离。

自适应系统在过程控制和机器人控制中的应用,也是相当一部分文章的主题。虽然其方案还是根据预测控制的,但是对象却渐渐扩展到非线性系统和多变量系统。为了提高控制效率,提出将长期预测改为有限预测是一种新的尝试,围绕它还可以有许多问题值得研究。

2 鲁棒控制

一个面向实际的控制律的设计必须具备一定的裕量。从而鲁棒控制就自然地成为控制系统理论中最重要的内容。下文介绍 H_∞ 方法和基准问题 (Benchmark Problem) 两个方面,这两个方向在本届 ACC 上表现出有较大的进展。

H_∞ 方法依然是这届 ACC 在鲁棒控制方面的主流。其中混合指标法受到了更多的关注。近年来这方面的研究基本上是遵循 Bernstein 和 Haddad 提出的思想来提出各种混合型指标的,并用这种指标试图解决控制系统的参数鲁棒性问题。文献[4]提出的混合型指标中将 H_2 和 H_∞ 优化问题综合起来的,还有利用 H_∞ 的次优解(作为约束条件)与 Riccati 方程的等价性的,也有利用 H_2 指标和 Lyapunov 方程之间关系的。对各种指标都有一些实现的算法,但总的说来,这些算法都比较繁琐,实用价值不大。如何确定加权混合指标、以及如何设计明显的直接的算法,特别是易于在计算机上实现的递推算法,将是这方面发展的方向。

Wie 和 Bernstein 在 1990 年的 ACC 上提出的所谓基准问题,即要求对一个具有不确定动态的系统,设计一个线性定常反馈,使闭环后系统能具有某种性质。如文献[5、6]提出了一些设计方法,如用结构奇异值进行设计,用最大熵进行设计,用近似极点配置进行设计等等,也有用 H_∞ 方法和对策论方法的。目前的设计却有一些缺陷。在达到目的前提下,简化控制器结构不光是从经济上考虑的,更是从效果上考虑的。从这点上讲,基准问题值得花力气去研究。

3 智能控制

智能控制是近年崛起的被认为是极有发展前途的一门控制技术。本届 ACC 上,研究智

能控制的论文约占总数的十分之一, 内容也有很广的覆盖面。其中较突出的是神经网络控制。

由于神经元有学习和记忆功能, 因而神经网络控制一问世便得到控制界的重视^[7]。总的来看, 本届 ACC 在神经网络控制的理论上仍无突破, 提出的算法也只是技术上的一些改善。只有一篇以两足行走机器人为对象的文章中, 提出的在不同层次结合具体环境的多重学习策略很有新意。对复杂系统应用神经网络控制来说, 这种学习策略也许是有前途的。本届 ACC 在神经网络控制的建模问题上有较大的进展。有文章提出用幅射基函数 (radical basis function) 取代 Sigmoid 函数作神经元作用的一种新的前向网模型^[8]。这种模型采用递推学习和局部学习的方法, 提高了控制精度和算法的收敛速度, 对实时应用很有吸收力。另外, 采用分段神经网络模型和控制器也具新意。这类设计思想与大系统的分解颇为相似, 它能降低由整体建模带来的复杂性, 模型匹配效果也较理想, 控制精度也有提高。神经网络控制和模糊逻辑结合也受到本届 ACC 的重视。会上提出了模糊神经元网的基本形态以及模糊推理过程, 用神经网络的学习功能对控制参数作调整。这方向的研究尚属起步阶段, 但很有前途。神经网络控制的一些成功的应用, 例如: 汽车的自动驾驶, 机器人视觉的伺服控制等等, 在本届 ACC 上已经成为智能控制的一个重要方向。

此外, 智能化容错技术和故障诊断方面近年来也颇有进展。提出的用学习方法建立非参数诊断模型以及用随机微分方程来研究容错技术的稳定性却具有新思想。例如以宇宙飞船反应堆控制为背景, 提出的自主环境中的自动推理也是很有启发性的^[9]。

4 非线性控制

近年来, 研究非线性系统的队伍日益扩大, 其主要原因在于实际要求系统有更高的精度和更好的性能。从本届 ACC 看, 非线性系统理论的一个重要发展趋势是与其他课题, 如自适应控制、鲁棒控制的结合越来越密切。另外非线性理论转化为应用的周期也越来越短。理论与应用联系越来越紧密。

非线性系统理论和其他课题的交叉结合主要体现在两个方面, 除了已经提及的非线性自适应控制外, 还有非线性鲁棒控制。

本届 ACC 上提出研究非线性鲁棒控制的论文主要分两个方面。其一是非线性系统的 H_{∞} 理论。由于线性和非线性之间存在着本质上的差别, 因而直接由线性系统的 H_{∞} 理论去建立非线性系统的 H_{∞} 理论是很困难的。提交的论文中有对非线性 H_{∞} 理论的提法和指标作了探讨, 但整个框架尚未确立。另一是非线性系统的微分几何方法和微分动力学结合起来。利用微分动力学的结构稳定性理论来研究非线性系统在参数摄动时的结构鲁棒性。这种想法已经被用到跟踪问题上; 另外微分动力学中分歧和混沌理论可以用来研究非线性系统在产生突变时的性能^[10]。会议提交的论文中有用分歧和混沌来研究数字控制系统和航天过程中的姿态控制的稳定性。

在本届 ACC 上, 非线性理论的应用论文占了很大比重。特别需要指出的是, 有一部分文章已经突破了过去限于线性化设计的局限性, 将一些新思想用到实际设计中去。例如将非线性理论用在蒸汽机过程控制^[11], 将非线性伺服理论用到机器人控制, 将非线性系统几乎干扰解耦理论用于化学反应器控制等等。这些刚刚提出的理论随即被用于设计, 可见非线性理

论与应用之间的间隔越来越短。

5 结束语

本文介绍了在近年来反映在控制理论几个前沿课题上的研究动向。除了上述四部分,线性系统依然是会上很重要的内容,其重点在线性控制器的设计方面。而从本届 ACC 的会议可看到的最重要特征是理论与应用之间距离在不断缩短。控制技术作为生产力的作用越来越明显。

参加本文准备工作的还有鲍平安、刘频、厉隽绎、高峰、徐炎华。他们分别对各节的介绍提供了素材。

参 考 文 献

- [1] Naik S, Kumer P R. A robust adaptive controller for continuous time systems, Proc. of 1991 ACC USA, Boston, 1991: 133—137
- [2] Middleton R, Kokotovic P. Boundedness properties of simple indirect adaptive control systems, *ibid.* 1216—1220
- [3] Kanellakopoulos et al. Systematic design of adaptive controllers for linearizable systems, *ibid.* 649—664
- [4] Steinbuch M et al. Necessary conditions for static and fixed order dynamical mixed H_2/H_∞ optimal control, *ibid.* 1157—1142
- [5] Stengel R, Maciejowski C. Robustness of solutions to a benchmark control problem, *ibid.* 1915—1916
- [6] Steinbuch M et al. Robustness for real and complex perturbation applied to an electro-mechanical system, *ibid.* 556—561
- [7] Narendra K, Mukhopadhyay S. Intelligent control using neural networks, *ibid.* 1069—1073
- [8] Jacobs R, Kokotovic M. A modular connectionist architecture for learning piecewise control strategies, *ibid.* 1592—1602
- [9] Chiu S, Chand S. Fuzzy controller design and Stability analysis for an aircraft Model *ibid.* 821—826
- [10] English F, Delchamps D. Chaotic behavior of digital control systems and its continuous dependence on parameter, *ibid.* 200—205
- [11] Pellegrinetti G. Control of nonlinear steam generation processes using H_∞ design, *ibid.* 1191—1197

New Development on Some Advanced Topics of Control Theory

Zhang Zhongjun Han Zhengzhi

Abstract This paper surveys the new developments on the adaptive control, robust control, intelligent control and nonlinear systems depending on the papers presented in the 1991 American Control Conference, and summarizes the characteristics of this conference.

Key words control theory, adaptive control, robust control, intelligent control, nonlinear systems