

当今控制理论面临的挑战与前景

黄琳

(北京大学力学系)

秦化淑

(中国科学院系统科学所)

郑应平

(中国科学院自动化所)

郑大钟

(清华大学自动化系)

[摘要] 本文共分三部分;第一部分是分析控制理论发展历史所得的结论;第二部分是当今控制理论面临的挑战;第三部分是进一步发展控制理论的前景;最后是结束语。

一、控制理论发展史的启迪

控制理论和其它技术科学理论一样,它的产生与发展主要由于人类生产与发展的需求并由人类已有的技术和知识水平所决定。控制理论中的一些概念,例如反馈、补偿等,早在一千年前的计时装置——水钟中已有体现。但水钟的故乡无论是希腊还是中国,由于生产需求和技术水平的局限,控制理论并没有在那古老文明的土地上产生出来。直到上个世纪,物理学家 Maxwell 才作出关于蒸汽机调速器稳定性分析的著名论文。这个人类第一篇控制理论的论文是蒸汽机和微积分与动力学结合的产物。又过了近70年,由于工业系统中机电回路的大量使用和研究的需要,加之积分变换方法在物理与技术科学上的成功应用,才产生了以 Nyquist 的工作所开创的基于反馈回路的经典控制理论。这时讨论的对象只是常系数线性单回路系统,涉及到系统的数学模式比较单纯,即使碰到诸如非线性和具有分布参数特征的环节,也力图用等价的线性环节并用经过适当修正的线性系统的方法和概念来进行办理。这时理论工作的特点是对象单纯,数学方法相对简单,没有也用不着使用复杂的计算手段。这种做法不仅在当时适应了科学技术和生产的要求,而且至今仍在众多生产领域中继续应用。

50年代开始,在人类的科技活动中发生了两个影响巨大的事件,这就是电子计算机的产生发展与应用,和人类进入宇宙空间。这两件事深刻地影响着人类科学技术的发展。借助20世纪数学的丰富成果,控制理论从60年代开始实现由经典理论到现代理论的转变。这一转变的特征表现在:

1. 系统从单回路模式下解脱出来,使控制理论研究的问题具有一般化、理论化和系统化的特点,从而为系统地适用各种数学理论与工具创造了条件。这样,也就获得了一系列经典控制理论所无法相比的深刻的理论成果,如状态空间描述的线性系统的几何理论,一般微分方程描述下系统的最优控制理论以及微分流形描述的非线性控制理论等。

2. 由于应用控制理论的范围扩大和受控制对象日益复杂,也由于人们对控制系统工作

国家自然科学基金资助项目

状况多变的认识加深,那种只依据控制对象的物理特征来进行数学建模的愿望,在实际工作中受到了限制,因而出现了对系统进行参数估计和辨识的理论。从控制科学的观点看,这是一个质的飞跃。由于随机过程与数理统计方法的推进,使这一方向获得了持久的生命力,并使得基于此的自校正与自适应控制成为一个应用广泛、很富吸引力的研究领域。

3. 由于控制系统的日益发展和电子计算机的不断发展与更新,使控制系统设计与研究中的复杂计算有了实现的条件。控制系统计算机辅助分析与设计(CAA和CAD)显示出日益重要的作用,而计算机仿真已经成为研究控制理论时的重要手段。

4. 由于科学技术的巨大进步,人们已经可以不局限在常系数线性系统模式中讨论问题,而直接把研究兴趣放到系统的分布参数和非线性特征之上,使理论研究和计算机方法相结合,揭示出存在系统中十分有意义的非定常、非线性和非集中参数的现象,使人们对于系统复杂的本质有了新的认识。

如果把由Понтрягин与Bellman建立的最优控制理论和Kalman关于系统基本结构的理论作为这个阶段的起点,经过近30年的研究,现代控制理论已经发展起来并形成了一个庞大的系统。纵观控制理论发展的两个阶段的历史,我们可以看出推进控制理论发展的主要动力是

1. 控制理论是一门技术科学理论,它研究的问题是人类生产和科技活动中提出来的,是研究在一定限制条件下发挥能动性,以实现了对系统进行控制的理论与方法。它不同于一般自然科学,控制理论的研究离不开工程背景与控制意义,工程技术始终是控制理论发展的动力。

2. 数理科学,首先是数学,始终为控制理论的发展提供理论分析的方法。首先,数学可以将控制问题的提法科学化与理论化,例如调节器问题、镇定问题以及解耦问题均可以提炼成一类数学问题。而后,数学又可以针对这类具有强实际背景的问题提供系统的研究方法。没有数学的严格理论的帮助,控制理论就不可能形成与发展。

3. 随着控制理论的发展,计算机在其研究中的作用愈益突出。经典控制阶段依据列线图进行设计的做法已为计算机辅助设计所代替。检验控制系统设计是否可行,最简便的手段就是进行计算机仿真。随着计算机功能的扩大,人机对话问题的解决,使得计算机已深入到控制系统设计和研究的各个领域。

经过两个阶段近60年的发展,控制理论已成为一个以工程为背景,以数学和计算机作为主要研究手段的一门技术科学。

二、当今控制理论面临的挑战与机会

如果以60年来控制理论发展所揭示的规律来分析当前面临的形势,便可抓住一些关键性问题和未来的发展方向,以使我们有可能在这种挑战面前把握住时机和主动权,从而作出贡献。也正由于此,国际上近年来的一些机构也在不断进行调研以期作出回答。例如,美国IEEE的控制系统协会与NSF在1986年就召开过有50多个世界第一流控制专家的高峰会议^[1]。1989年,美国NSF又同海军、陆军与空军的研究单位联合支持召开了讨论控制理论前景的SIAM(工业应用数学协会)的研讨会,并发表了有关的报告^[2]。我们也深切感到这种调研的必要,在长达四年调查研究工作的基础上,1991年召开了复杂控制系统理论的研究

讨会, 并达成了下面的认识。

1. 非线性问题

作为现代控制理论基本模型的常系数线性系统的研究已经成熟, 由于其要求时不变和满足迭加原理, 因而日益显出局限。这是由于

(1) 线性系统模式表明其状态空间中的全部运动形式均在其平衡点附近可以得到, 但大量实际系统并不具备这种特征而呈现非线性现象——自振、分岔、奇怪吸引子及混沌等。

(2) 很多近代控制对象, 例如航天器、机器人及机械手等, 其受控运动是大范围的, 此时系统满足的方程是刚体或刚体系的大范围运动的非线性方程, 而不可能采用任何线性化手段, 无法用线性模式来进行刻画。

(3) 大量线性元件的集成不可能产生质的飞跃, 但大量的非线性元件的集成, 却可以产生质的飞跃, 它可以形成联想、学习、智能功能等, 可以实现寻优的计算。近来关于元胞自动机和神经网络等, 都是由非线性元件组成的。物理学家已利用这一点采用自学习的方法, 不对倒摆进行数学物理方面的建模而实现了控制。

以上表明研究非线性问题不仅是不可避免的而且是大有可为的。80年代出现的对于非线性控制的研究热潮, 应归功于微分流形及而后的微分代数方法的运用。但由于计算上的困难和用这类方法能研究的非线性系统又十分局限, 使人们清醒地看到非线性问题的困难, 而希望寻求新的方法。非线性科学首先是引起物理学家的注意, 在物理学的不同领域内都兴起了非线性热, 研究成果五彩缤纷, 如各种新型的计算网络、模拟退火、悬浮玻璃等接踵出现。但这些新事物究竟能做什么和成功到何等程度, 对研究者仍是一个谜, 这样, 也就吸引了更多的人参与进这个领域。虽然上述两类非线性研究还没有融合为一体, 但由于这两者都需要采用动态系统与流形作为工具, 都要讨论非线性系统动力学, 并且控制的思想方法日益渗透进非线性科学, 而非线性科学的成果又可以帮助人们解决非线性控制的问题。这表明, 将这两者结合起来, 将会出现光明的前景。而这一结合的关键之一, 是将理论与计算机的研究结合起来。

2. 鲁棒性问题

系统的鲁棒性是指在系统中存在不确定性因素时, 系统保持其正常工作性能的问题。当系统中不确定性并不影响其稳定性时, 则称为具有鲁棒稳定性。鲁棒性的研究有两个不同时期: 前期是关于系统的灵敏性的分析, 此时的不确定性是作为微摄动进行考虑的, 对应的问题比较容易解决; 当前, 鲁棒性研究的特点是讨论非微有界摄动, 传统数学分析的方法对这类问题已无能为力, 需要的是能进行大范围分析问题的方法与理论。

单就鲁棒稳定性分析而言, 现今已有的结果仍然很少, 这是由于在系统的不确定参数空间中稳定性区域并不具凸性。也就是说, 当两点对应的系统均稳定时, 并不能保证联结两点线段上的点均对应稳定的系统, 这种非凸性是研究的主要困难。这方面两个最重要的进展是关于区间多项式族的 Харитонов 定理和关于多项式凸多面体的棱边定理, 这两个结果都是假定多项式系数只是不确定参数的一次函数。对于多项式系数是不确定参数的非线性函数时, 有用的结果依然很少。至于鲁棒镇定和鲁棒综合问题, 即对于一个开环系统族, 在何种条件下可以求得一个控制点, 以使整个闭环系统族均为稳定或具有其它合宜的性质的问题, 目前的研究还刚刚开始。

在鲁棒控制的领域内,另一个十分活跃的问题是,要求系统由干扰至偏差的传递函数的 H_x 范数取极小的优化问题,这就是所谓 H_x 问题。由于这类问题最后归结为控制理论中常见的 Ляпунов 方程和 Riccati 代数方程的求解,并且对于系统中存在不确定性时的稳定设计也能转化为这类问题的求解,因而 H_x 理论至今仍呈现一种不衰的势头。但如何解决其计算上的困难和解决非微摄动下对应的理论和方法,仍然是富于吸引力的。

上述的两类鲁棒性问题,由于其与控制工程的天然联系,在进行理论研究的同时,积极开展计算机研究,将可能把现今的控制设计方法提高到进行鲁棒设计的新的程度。这一高度的达到必然地要求在理论上也取得新的突破。

3. 具柔性结构的问题

如果一个系统的状态或分状态,不仅随时间而且也随空间位置变化,则描述系统的方程将不再是常微分方程而是偏微分方程。这类分布参数系统的研究虽然已有约40年的历史,但真正引起控制界巨大研究兴趣的,主要还应归功于空间工程和机器人的发展的推动。当前,最富有吸引力的分布参数系统问题就是具有柔性(首先是弹性)结构的系统,如轻臂机械手、大尺度太阳能帆板、系留卫星(航天器与卫星间以绳联结)等的控制是这类系统典型的对象。

研究这类系统控制的首要问题,是动力学建模问题。简单以梁为例,至今大多数研究梁控制的方程仍是1735年 D. Bernoulli 的简单模型。分析表明,对于这种梁的模型,在讨论其振动问题时,即使对于振动频率,也只是对开始的几个振动频率比较正确;而对于考虑了旋转惯性与剪力的 Timoshenko 梁,虽然在讨论这种模型弹性振动问题时较好地与实际吻合,但由于其复杂性,至今还很少有人用它来研究控制问题。在具有弹性体的控制问题中,究竟采用何种力学模型,不同力学模型之间的比较,一些力学或物理的基本前提在动态控制中是否仍有效(例如平截面假定等),都是值得研究的。一个梁尚且如此复杂,更不必说板和其它几何形状(例如伞形结构)的物体的控制。再考虑到对于这类问题除了镇定以外有时还必须考虑形状控制以及运动的控制等复杂的问题,可以看到我们面临的挑战是多么严重。

空间结构一般刚度小、薄而轻,在重力场中自身难以支撑且容易出现频率集中。在这类结构中应存在波动现象,而这个现象与离散化后的有限维线性系统在可控性这一基本问题上就存在矛盾。目前的弹性体系统的控制仍然采用振型分析的模态控制,这种建立在有限维系统之上的理论与方法,对于本质上是无穷维的系统能否适用,一直是受到关注的,所谓控制溢出与观测溢出的问题均由此而产生。

对于系留卫星这种用柔绳相联的两个系统和卫星上带有太阳能帆板,都是刚体与柔性体混合的系统。一般讲对于具有不同刚度的物体组成的系统,其建模与控制的难度是可想而知的。为了解决这类问题,简单化的工程分析,盲目的仿真和纯数学的研究,看来均无济于事,需要的应该是控制工程,结构力学,数学和计算机的有机地结合,采用多种手段互为补充,这样才有可能取得实质性进展。

4. 离散事件系统的问题

由于计算机集成制造系统(CIMS)、通讯网络和计算机网络系统的应用需要,使20年代就开始的以电话服务为背景的排队论的发展获得了新的活力。在控制界,这就是80年代兴起的离散事件动态系统(DEDS)的研究。这一研究对于生产过程自动化、自动化调度、计算机通讯等一系列问题有着深远的意义,因而成为自动控制、运筹、计算机诸界关注的热

门。由于这类系统状态的改变不是由时间尺度,而是以事件的产生或结束来决定,此时,描述系统的状态空间是完全离散的而不具拓扑结构的集合,因而描述这类系统的模式就不是常见的方程模式。就目前的发展水平,其模型已不下十多种,主要可分为三类:(1)逻辑层次模型,包括形式语言/有限自动机模型、Petri网模型、时间逻辑模型等;(2)代数层次模型,包括极大代数、有限递推、条件/事件系统、混合动态系统等;(3)随机品质层次模型,包括排队网络模型、广义半马氏过程模型、仿真及摄动方法等。这些模型各有利弊,各自能反映DEDS系统的一个方面,它们之间的联系和如何将它们尽可能统一,始终是大家关心的问题,但离开解决还是相当遥远的。

如果说DEDS的研究已有不少工作的话,就控制而言,目前这些工作与控制还基本上不沾边,如何建立离散事件控制系统(DECS)的理论则更是困难的任务。无论是DEDS还是DECS理论工作的进展,都将会对未来新的控制理论的建立起到重要作用。

三、控制理论的前景

现今控制理论所面临的挑战,除以上所列举的一些方面外,从系统的总体特征上还遇到了一些前所未有的问题,而这些问题的解决可能意味着新一代控制理论或复杂系统控制理论的产生。这些新问题是:

1. 多模式子系统的集成问题

对于多机械手的协调控制,其上层可能是Petri网而下层是机械手,这就遇到在不同层次上不同模式(DEDS与受控机械手)的集成,而前述具有太阳能帆板的卫星控制,则是在同一层次上不同模式的集成(刚体与柔性体)。从物理分析系统模式的非单一性是系统面临复杂性的方面之一,它可以是静态与动态系统的集成,集中参数系统与分布参数系统的集成,甚至也可以是可用数学描述的系统和非数学建模的系统的集成。对于这种组合模型的系统,如何研究并寻求统一的处理方法是十分困难的。

2. 复杂的相互关联

解决多模式子系统集成问题的关键之一,在于相互关联的研究。由于是不同模式之间的关联,这就不同于现今大系统理论中相同模式之间的关联可简单地用关联矩阵加以描述。关联的实质,在于子系统间在信息上的输入与输出问题,这就涉及到大量信息处理与压缩的过程,有时关联甚至涉及到模糊信息、决策、关联的失效与重构等问题。

3. 环境的复杂与强适应能力

环境的复杂多变,使控制系统或具有强鲁棒性,使一个控制器能适应系统的很多工作状态,即控制器可以控制一个系统族;或使系统具有强的自适应,以便随时按系统的变化来改变控制器以满足要求;或在一定范围内具有鲁棒性,而在此范围外采用适应性等等。所有这些不仅涉及到理论问题而且涉及到一系列的计算机应用问题。

4. 控制与决策的复杂性

以往的控制理论中的控制通常以反馈与补偿这两种形式出现。但复杂控制系统中的控制则呈现出多通道(控制输入、调整参数与改变结构)、多层次(上层运筹下层控制等)和多模式(连续、离散、决策型等)的特点。实现这类控制必须借助计算机,有时也把计算机作为一个控制单元实现一体化。目前这方面的控制装置已经出现,但其理论研究仍十分贫乏。

解决上述四方面的任务,将为新一代的控制理论——复杂控制系统理论创造条件。从前面的分析可以看出,在未来的这一理论的创建与研究中,计算机将发挥越来越重要的作用。由于系统中控制的复杂性与在线计算之间可实现性的矛盾,原来立足于 von Neumann 串行结构的计算机,由于其计算速度与存贮量上的局限,可能不能满足需要,而须寻求新的控制计算机,目前出现的基于并行原理的高速计算机装置将可以担当这一角色。由于现有的全部控制系统 CAD 与分析的算法与软件几乎都是基于 von Neumann 原理的,因此在研究并行计算机的同时,必须同时开展基于并行算法的控制理论与设计的研究。首先,要把现有的算法改造成运用并行算法的,这个任务十分有意义但也很困难。在有了基于并行原理的算法、软件与计算机以后,将理论(首先是控制中的数学与应用数学)与计算机紧密地有机地结合在一起。在这里计算机的作用已不仅限于进行计算与仿真,而是充分发挥其作用,把包括专家系统、符号运算与机器推理、智能等的作用调动起来,使其成为新的理论研究所不可缺少的一员。过去仅仅依靠数学演绎的方法来研究控制理论的做法已经不能满足复杂控制系统理论的要求,将数学和计算机有机地结合在一起将是研究复杂控制系统理论的必由之路。

结 束 语

控制理论发展至今天正处在一个转折的关键时期,充满了挑战与机会。60年代初,我国的控制理论界曾经利用那一次转折在现代控制理论方面做出了一些很有价值的工作,但好景不长,由于左的破坏,使我们当时已经具有的势头不得不停顿与中断,而使我们落后了近 20 年。现在,我们才重新大规模地开展了工作,当前我们与国际上在控制理论上的差距并不明显,如果我们能把握时机,组织力量,形成几个研究中心,我们就可能在下一个转折中做出重要的成果,使中国在复杂控制系统理论的研究中具有举足轻重的地位,这是我们的责任也是我们的幸运。

致 谢

本文是集体智慧的产物,北京大学、中科院系统科学所与自动化所、清华大学、航天部北京控制工程所、东北工学院、西北工业大学的有关教授、学者参与了讨论。特别是中国自动化学会理事长、学部委员杨嘉墀教授对本文的形成提出很多富有启发性的意见,对此我们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Challenge to Control —— A Collective View, Report of the workshop, Univ. of Santa Clara, Sep. 18 — 19, 1986. Sponsored by the NSF in Cooperation with the IEEE Control Systems Society, Dec. 1986.
- [2] Report of the Panel on Future Directions in Control Theory: A Math. Perspective, SIAM Reports on Issues in the Math. Sciences, Supported by NSF, Air Force Office of Scientific Research, Army Research Office and Office of Naval Research.
- [3] 郑应平, 控制科学面临的挑战——专家意见综述, 控制理论与应用, 第4卷, 第3期, 1987.
- [4] 黄琳, 控制理论发展过程的启示, 系统工程理论与实践, 第10卷, 第6期, 1990.

CHALLENGE AND PROSPECT TO MODERN CONTROL THEORY

Huang Lin

(Dept. of Mechanics, Peking University)

Zheng Inping

(Institute of Automation, Academia Sinica)

Qing Huashu

(Institute of System Science, Academia Sinica)

Zheng Dazhong

(Dept. of Automation, Tsinghua University)

Abstract

There are three parts in this paper. In §1, some conclusions are given by analysing of development history of control theory; the challenges of modern control theory are discussed in §2 and the prospect of further developing control theory is described in §3. In final, the conclusions and acknowledgements are given.

纪念国家自然科学基金十周年 新闻发布会在京举行

纪念国家自然科学基金十周年新闻发布会5月25日下午在北京举行,国家自然科学基金委员会主任张存浩教授向中外记者发表了讲话。委员会领导成员就各自分管的工作回答了中外记者的提问。

张存浩主任向中外记者说:为加强基础研究,1992年国家财政增加自然科学基金拨款5000万元,使国家自然科学基金总额由1991年的1.76亿元提高到今年的2.26亿元,其增加幅度与增长率都是国家自然科学基金委员会成立以来最大的,体现了国家对科学基金事业及基础的重视和支持,对我们是很大的鼓舞。增加的经费,我们将根据国家关于稳定一支精干的基础研究队伍,加强基础研究的要求,主要用于增加对于基金项目的资助强度,预计今年面上项目平均资助强度可达到5万元以上。

张主任在会上通告了国家自然科学基金委员会将进行五项新的改革试点:

- 1、开辟资助优秀中青年科学人才专项基金;
- 2、开辟资助新医药、新农药基础研究的专项基金;
- 3、开辟资助留学人员短期回国工作、讲学的专项基金;
- 4、开辟面向优秀国家重点实验室研究项目的专项基金;
- 5、设立基金资助项目优秀研究成果专著出版基金。

张存浩主任等就设立资助优秀中青年科学人才,新医药、新农药基础研究,留学人员短期回国工作、讲学等五项专项基金,大陆科学家访台,地区科学基金,部门、地方、单位科学(技)基金,基础性研究成果开发转化等问题回答了记者的提问。

中外记者80多人出席了新闻发布会。

(宣传调研处 供稿)

A PRESS CONFERENCE CONCERNING THE CELEBRATION OF THE 10TH ANNIVERSARY OF NSFC WAS HELD IN BEIJING