

新新领域对控制理论的新求和挑战*

程代展 中国科学院数学与系统科学研究院

控制理论具有两个明显的特征：一个是它具有数学的严密性；另一个是它在科学与工程中的广泛应用。一方面控制理论涉及的数学十分广泛，几乎所有的数学工具都能用上。关肇直先生曾说过，研究控制理论，十八般武艺都能用上。而历史上真正对控制理论做出突出贡献的学者，如 Pontryagin, Bellman, Kalman，都是数学家。控制论创始人 Wiener 有一本自传《我是一个数学家》(Wiener, 1964)。

另一方面，控制理论有其极强的实践性。回顾控制理论的历史，是自动调节或控制装置的开发和应用催生了控制理论。早在远古时代，中国的指南车、地动仪、翻斗水车等，就是早期的自动化装置。明朝科学家宋应星写的《天工开物》，里边有许多中国古代的自动化装置。在西方，一千多年前雅典的克泰希斯水钟利用反馈原理调节流量。在欧洲工业革命时期出现的瓦特蒸汽机的离心调速器，俄国人发明的锅炉水位自动控制装置，以及较后出现的轮船自动驾驶仪等，则已具备近代自动控制器械的雏形。

到了 20 世纪初，在工业过程控制中出现了 PID 控制器；瑞典工程师 Dalen 发明了用于灯塔和浮标照明储气器的自动调节器，从而获得了 1912 年诺贝尔物理学奖。1913 年，Wright 兄弟的飞机飞行成功，飞机控制成为另一个研究热点；在理论研究方面的进展包括：Nyquist 和 Bode 发展了一套检测系统稳定性的办法，Lyapunov 的运动稳定性理论，Hurwitz 和 Routh 等的稳定判据，以及苏联学者提出的谐波平衡法……这一切都为控制论的诞生准备了条件。

第二次世界大战期间，为了设计火炮定位装置、雷达跟踪系统、飞行器及战舰的自动驾驶仪，甚至包括初期导弹制导等，自动控制的相关理论和新技术得到很大发展。这个时期的主要成果形成了以反馈理论为基础，以传递函数、拉氏变换为主要工具的古典自动控制理论。Wiener 在 1948 年出版了一本书，叫《控制论——关于在动物和机器中控制和通信的科学》。这本书提出或概括了许多控制论中的概念和方法，如反馈、稳定性、镇定等。通常将这本书作为控制论诞生的标志。但实际

* 转载自《系统与控制纵横》2015 年第 2 期。

上,是钱学森的《工程控制论》平息了学术界对维纳控制论的怀疑,使控制论与工程应用紧密联系起来。此后,由于航空、航天等新技术的需求,以及近代计算机的助力,控制理论又有了一个较大的飞跃。代表性的理论贡献包括 Pontryagin 的极大值原理、Bellman 的动态规划、Kalman 的状态空间方法及 Kalman 滤波。这些工作使控制理论有了一个质的飞跃,建立在这些工作基础上的理论成果被称为现代控制理论。因此,从学科自身的特点看,工程以及科学研究中的应用是控制理论的一条重要生命线。

再从控制理论学科发展的时间点看,控制论在 20 世纪兴起并隆极一时。钱学森曾说过相对论、量子力学和控制论被认为是 20 世纪最伟大的三项成就。2010 年何毓琦先生转发了美国 NSF 项目主管的一句话:“控制已经死了”(control is dead),这在国内控制界引起一场轩然大波。不管对这些说法的认同程度如何,有一点大概是不争的事实:目前,控制论被人们关注的程度比 20 世纪下降了许多。其实,这一点也不奇怪:20 世纪下半叶是现代控制理论的创世期,自然会轰轰烈烈。当一种面向应用的理论体系成形并且成熟后,对它的关注度一定会下降。

但是,对单纯理论研究兴趣的降低并不说明学科重要性的降低。正因为控制理论在理论和方法上的成熟,它开始在众多科学技术领域发挥越来越大的作用。因此,如果用一句话概括控制理论现状的话,或许可以说“现在是应用(特别是高科技)导向的控制理论发展的黄金时期”。20 世纪,当人们谈论控制理论时,常常按照系统(即控制对象模型)的形式将控制理论分为线性系统(理论)、非线性系统(理论)、分布参数系统(理论)、随机系统(理论)等。这样的划分,不仅体现了模型的不同,也反映了所使用的基本数学工具与方法的差异。可以说,这是基础理论研究方向时期的特征。从 20 世纪末到 21 世纪初十余年,由于信息爆炸,高新科技的飞速发展,以及科学技术对空间、时间、速度、能量、温度、压力等极限条件的挑战,应用导向的控制理论研究成为主流。因此,当今人们谈论控制理论时通常冠以研究对象,如复杂系统控制、网络控制、飞行器控制等。正是这些高科技领域的飞速发展,为控制理论的发展提出了挑战,也提供了大好的发展机遇。当然,这并不意味着控制学科自身的理论突破不会在将来某个时间点再次成为主流,恰恰相反,高科技的挑战或许会是重大理论突破的导火索。

那么,当代哪些新兴的科技领域对控制理论的挑战最大,或对控制理论的发展影响最大呢?先从广义角度看,包括控制理论在内的整个科技界所面临的主要挑战性问题有哪些呢?国际上在这方面也有许多讨论。例如,美国国家工程院和欧盟组织的一些专家近期提出的一些研究报告都对此发表了一些有价值的探索(National Academy of Engineering, 2008; European Commission, 2010a; European Commission,

2010b; Ogle, 2007)。从美国国家工程院的报告 (National Academy of Engineering, 2008) 看, 主要提到①太阳能、风能等环境友好型能源的开发, 对核能的安全使用等; ②二氧化碳的减排和生物吸收, 防范酸雨, 水污染、全球变暖, 对氮循环的反措施、水资源保护等; ③大脑的逆向工程、健康信息的计算机处理、开发新药等; ④对付恐怖主义以及地震、暴风等灾害; ⑤计算机病毒、网络空间的安全保障等。欧盟组织的一些专家的报告 (European Commission, 2010a; European Commission, 2010b; Ogle, 2007) 大致类似, 但也有各自不同的侧重点。文献 (Samad and Annaswamy, 2011) 将以上报告中提出的主要挑战大略地总结为四个方面: 能源、环境、交通、生命健康。

由于控制理论在科学技术及各种工程问题中的普适性, 当今社会对科技领域的挑战几乎无一例外地直接或间接地转化成为新兴科技领域对控制理论的挑战。当然, 作为控制领域的科研人员, 我们有必要将广义需求与具体学科特点相结合, 提出更具体的控制理论学科所面临的挑战和应战的举措、路线或设想。国际控制界的组织和学者在这方面也做了许多探索。

在 21 世纪初, 美国空军部曾组织一批国际控制论著名专家, 研讨新世纪控制论的走向。在研讨报告 (Richard et al., 2003) 中指出, 前瞻的应用研究方向包括: ①飞行器与交通; ②信息与网络; ③机器人与智能机器; ④生物学与医学; ⑤材料与过程等。这是一份很有价值的研究报告, 对每个研究方向都有详细的说明。和美国工程院、欧盟组织的一些专家的报告 (National Academy of Engineering, 2008; European Commission, 2010a; European Commission, 2010b; Ogle, 2007) 相比, 它更强调挑战问题背后的科学问题。

2011 年, IEEE 控制系统协会 (IEEE Control System Society) 组织一批专家撰写了一份新的关于自动控制的研究报告, 标题是《控制技术的威力 —— 综述、成功故事和挑战》(*The Impact of Control Technology—Overview, Success Stories, and Research Challenges*)。其中, 提到的新的交叉研究方向包括: ①网络化决策系统 (Networked Decision Systems); ②网络物理系统 (Cyber-physical Systems); ③认知控制 (Cognitive Control); ④系统的系统 (Systems of Systems)。该报告列举的控制理论所面临的挑战性问题可大致归纳如下: ①生物系统控制; ②能源与智能电网; ③网络与通信; ④汽车控制; ⑤控制装置 (原子力显微器、采油平台等); ⑥经济系统; ⑦算法与可靠性等。

国际自动控制联合会 (IFAC) 最近的一份战略规划 (IFAC, 2012) 还列举了八个新的发展方向, 包括: ①网络化控制系统 (Networked Control Systems); ②量子控制 (Quantum Control); ③微系统与纳米系统 (Micro and Nano Systems); ④智能

建筑 (Smart Buildings); ⑤博弈论方法 (Game-theoretic Methods); ⑥控制的优化 (Optimization for Control); ⑦医疗保健系统控制 (Control of Healthcare Systems); ⑧逻辑网络与逻辑动态系统 (Logical Networks and Logical Dynamic Systems)。

综上可见,国际学术组织和相关国家也十分重视现实世界的挑战及其带来的学科发展的方向性研究。对控制领域的研究基金向应用而不是基础研究倾斜,特别重视应用中的挑战性问题(报告原文:“…… recent funding trends in control point toward applied rather than basic research and toward the pursuit of application challenges”)。实际需求和挑战对具体学科及相关研究具有重大的指导意义。特别是像控制理论这样为前沿科技发展服务的学科,必须与时俱进。这使得研究新兴领域对控制理论的需求和挑战成为一个刻不容缓的重要课题。

中国是最大的发展中国家,有自己的国情。根据我国的发展阶段和现状,我们一方面必须关注国际自动控制领域的发展动向,在研究工作中与国际接轨,力求做出前沿突破性的工作。另一方面,也要根据中国的国情,包括国民经济的需求,按照有所为有所不为的原则,提出我们所面临的主要需求和挑战,以及应对这些挑战的战略设想。下面提出几个挑战性问题。

(1) 航空航天:无论是航空飞机还是航天飞行器都是国际科学技术竞争和对抗的前沿,是国家的迫切需求,它们的控制问题面临许多挑战。这些挑战包括:模型的复杂性,即非线性、相合、高速、不确定等;异构控制;信息、通信、环境、容错以及计算机数值实现等。

(2) 新能源与智能电网:目前,能源资源的短缺与激烈的国际竞争,成为对人类生存与发展的重大考验。然而,风能、太阳能等新能源存在难以储存、难以控制等特性。建立能控制的智能电网,包括大型蓄能装置、燃料电池,涉及电网的自愈、兼容、优化、互动与集成。这一切都需要新的系统建模、估计和预测、协调控制等控制理论工具。

(3) 生物系统调控:生命科学被认为是 21 世纪的科学,这是因为人类基因组计划的完成和测序技术等进步,使人们对生命体的研究从对单元素的研究进入了对整个系统的研究。系统生物学需要将经典的分子细胞生物学方法与“组学”方法、系统控制理论、数学等组合起来,对代谢系统完成整体认知、评价,从而实现复杂分子网络进行控制与改造。

(4) 网络化控制与多自主体协调:人类社会如今已进入了网络时代。随着微传感器、微控制器、微电机、传感器网络与通信网络技术的高速发展,分布式的控制技术得到越来越广泛的应用。它具有集中控制系统所不具备的性质,如通信信道约束、系统连接拓扑与扩展问题、用局部控制律实现整体目标等。这些挑战要求一种

网络化分布式的新的控制理论。

(5) 微观世界调控: 诞生于 20 世纪的量子理论, 使人类对微观世界有了革命性的新认识, 并产生了以激光、半导体和核能等为代表的第三次技术革命。量子控制是量子力学与控制论交叉的新兴学科。它在开放量子系统控制、量子系统动态解相、量子估计与传感、量子反馈控制等若干相应经典控制问题上向控制论提出了新的挑战。

“为了应对这些挑战, 我们必须发展新的数学系统与控制理论、算法、控制方法及工具”(Samad et al., 2011), “随着控制应用越来越复杂和多样化, 继续与数学结合变得越来越重要”(Richard et al., 2003)。特别是考虑到我们所处的计算机时代, 以及计算机对控制发挥的日益重要的作用, “科学的重要发展将发生在计算机科学和对科学发展有潜在深刻影响的诸多科学交界的领域, 特别是研究复杂系统的科学领域”(Emmott, 2006)。因此, 这些挑战的解决很可能会依赖于一些与计算机相关的新的数学工具。

参考文献

- [1] 贝塔朗菲·冯. 一般系统论. 魏宏森, 译. 北京: 清华大学出版社, 1987
- [2] 钱学森. 论系统工程. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1982
- [3] 英大百科. 中文版. 1985, 4
- [4] 普利戈金, 斯唐热. 从混沌到有序. 曾庆宏, 沈小峰, 译. 上海: 上海译文出版社, 1984
- [5] Bukhachenko A L. 还原论 —— 检验真理的标准. 俄罗斯科学院通报 (俄文), 2013, 83: 12
- [6] 钱学森. 物理力学讲义. 北京: 科学出版社, 1962
- [7] Maxwell N. The Comprehensibility of the Universe. Oxford: Clarendon Press, 2003
- [8] 吴文俊. 计算机时代的脑力劳动机械化与科技现代化. 蔡自兴、徐光佑著《人工智能及其应用》一书的代序. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [9] Weinberg S. Lake Views—This World and Universe. Harvard: Belknap Press of Harvard University, 2011
- [10] 吴杰. 系统哲学. 北京: 人民出版社, 2008
- [11] 李喜先. 科学系统论. 北京: 科学出版社, 1995
- [12] Brockman J. What We Believe But Cannot Prove. New York: Harper Collins, 2006
- [13] Wiener N. Differential space. J. Math. Phys., 1923, 3:131-174
- [14] Wiener N. Un probleme de probabilités denombrables. Bull. Soc. Math. France, 1924, 52: 569-578
- [15] Kolmogorov A N. Über die analytischen metoden in der Wahrscheinlich-Keitsrechnung. Math. Ann, 1931, 104: 415-458

- [16] Ito K. Stochastic intgral. Proc. Imp. Acad. 1944, 20: 519-524
- [17] Chen H F(陈翰馥), Guo L(郭雷). Identification and Stochastic Adaptive Control. Boston: Birkhauser, 1991
- [18] 侯振挺, 郭先平. 马尔可夫决策过程. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1997
- [19] Yong J M(雍炯敏), Zhou X Y(周迅宇). Stochastic Control. New York: Springer, 1999