

钱学森与控制论

郑应平 同济大学CIMS研究中心

文章首先介绍了控制论的内容、方法和意义，以及历史回顾，并特别强调其在人类文明和科技发展中的重要地位，进而介绍了钱学森《工程控制论》的内容、观点及其在整个控制论发展过程中的承前启后作用，特别强调了它定位于面向工程应用的理论及其技术科学的特点，即把工程实际中行之有效的原理和方法整理总结成为理论，又将此理论在解决工程问题中不断充实、提高和发展。随着他结合系统工程和大系统、复杂系统乃至复杂巨系统的控制问题逐步形成的综合集成方法论体系，进一步明确了他对控制论在系统科学体系中的地位、作用和现代发展方向的观点，对现代控制论的发展起到了重要的推动作用。文中具体介绍了系统工程、系统科学体系和复杂系统控制理论的发展和融汇，指出它们已成为当前科技迅猛发展的重要方面。最后简要介绍了当前信息科学全面发展的趋势，以及系统和控制理论在现代社会发展中的重要历史使命。

[关键词] 控制论；工程控制论；技术科学；复杂系统控制；复杂巨系统综合集成方法论

1、控制论的基本内容、发展过程及其对社会发展和科技进步的重要作用

人类在社会实践中很早就希望构造一些精巧的机器能够代替人类自动完成一些复杂的操作。最早实现的这类功能包括自动计时，自动定向，利用水力、风力的自动装置等等。科学技术发展的推动力归根结底来自于社会生产的需求。瓦特蒸汽机首先解决了动力问题，但为了能够正常工作，瓦特还发明了一种离心调速器，它能自动调节进汽阀门以保持一定的转速。这里他实际上已采用了反馈原理，即根据转速变化引起离心球高

度变化反过来调整蒸汽输入以调整转速。这里有个“度”的问题，即不能矫枉过正，否则会恶性循环，自激振荡。为此物理学家麦克斯韦研究了这种反馈系统的稳定性问题，并于1868年发表论文“论调速器”，当属最早的理论工作。

当时控制的对象主要是机械和电子系统。20世纪20年代以来，在电路和无线电方面运用频谱分析方法得到了关于系统稳定性和其他品质分析的大量成果。这套理论恰好可用于控制系统分析，形成今天所谓的古典调节理论，至今仍广泛用于许多简单的实际问题。较复杂的问题则涉及非线性和随机输入下的系统品质和控制问题。前者导入了李雅普诺夫和庞加莱关于动态系统稳定性和动态行为的定性分析方法；后者则由维纳发展了统计滤波和预测理论，据说曾用于二战中的防空火炮控制。上世纪30、40年代，系统和控制思想空前活跃，有贝塔朗菲的一般系统论，维纳的控制论，香农除了信息论以外，还发表了关于继电开关逻辑综合的理论，至今仍是计算机等离散状态系统控制综合的理论基础。冯·诺依曼除了决策和博弈理论以外，还提出了现代计算机体系结构和自组织、自修复、自繁殖系统的初步想法；阿什贝的控制论则比较强调从生物医学的角度提出新的思想，例如体温的自行镇定（homeostat）和适应环境（ultrastable）的系统。所谓“老三论”就是那时开始形成的，它们今天仍然是信息科学技术发展的部分理论基础。

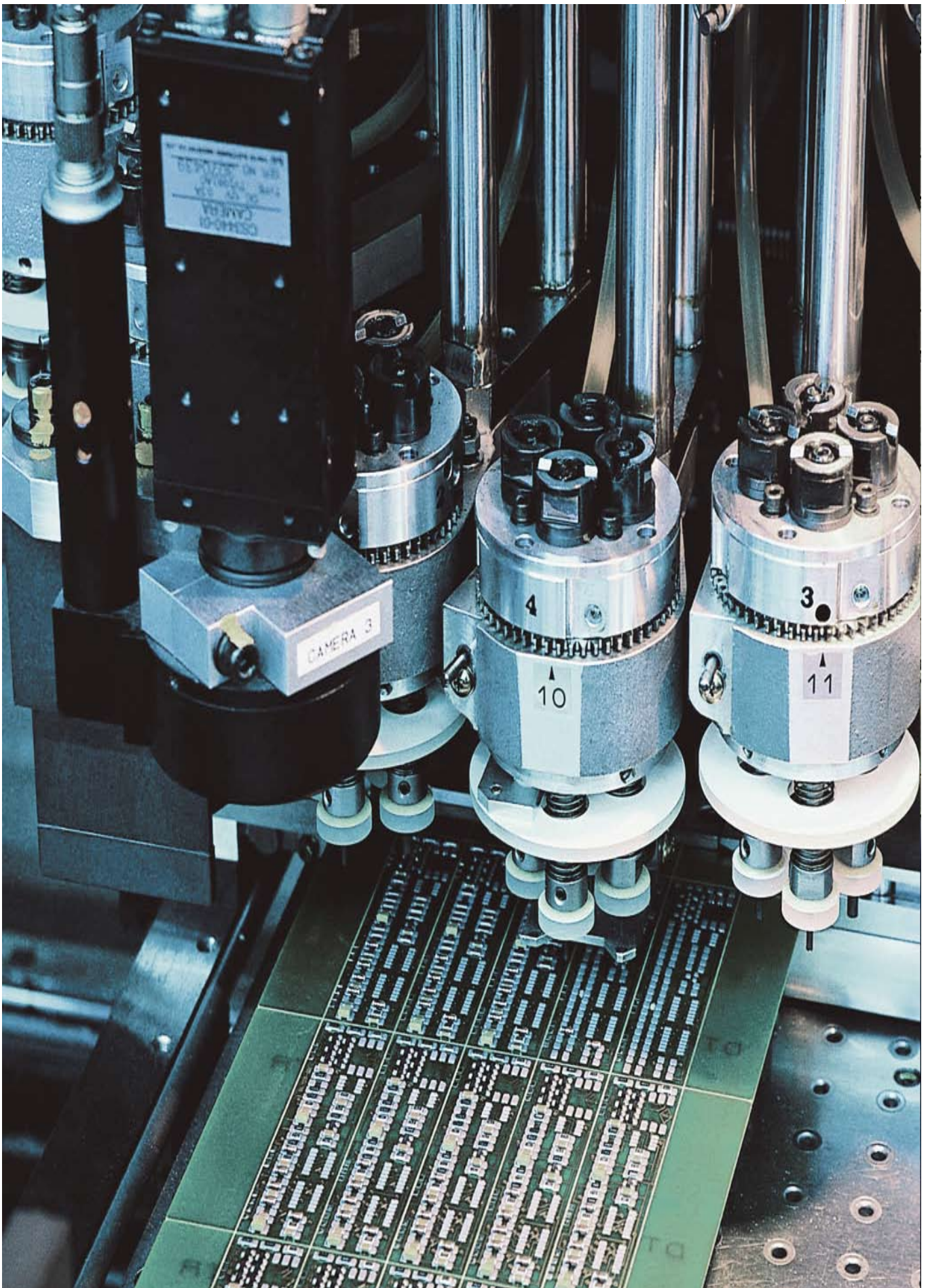
2、控制论发展面临的问题与钱学森《工程控制论》的发表

维纳把控制论界定为“在动物和机器中控制和通讯的科学”，他选用的术语“Cybernetics”既来自希腊文中“掌舵人”的概念，又与麦克斯韦1868年的论文中“调速器”一词有关。但其内

容主要涉及统计力学在通信、滤波和控制中的应用。反馈原理和稳定机制，控制论原理在生物医学和社会管理中的应用等等。这也不难从其各章标题看出：牛顿时间和柏格森时间，群和统计力学，时间序列、信息和通讯，反馈和振荡，计算机和神经系统，完形和普遍概念，控制论和精神病理学，信息、语言和社会等等。此外在第二版还加入了自繁殖机一章。阿什贝的书也类似。他们较多地谈论思想和方法论，而如何将它们用于解决工程实际问题已成为人们关注的焦点。

钱学森的《工程控制论》（英文版）^[1]在1954年应运而生。它包括18章，其篇幅按1958年的中译本^[2]计为33万字，其内容特点可概括如下。

1) 面向工程应用的理论。书中指出，控制论（Cybernetics）一词，安培曾于1845年用于描述一种关于国务管理的科学；工程中广泛应用的古典（伺服）控制系统理论（1930–1940年）是关于机械系统与电器系统的控制与操纵的科学；维纳控制论（1948年）则是一种较为普遍的关于动物体和机器的控制与通讯的科学；钱学森进而将控制论的主要问题概括为“一个系统的不同部分之间相互作用的定性性质，以及由此决定的整个系统总体的运动状态”的研究；而工程控制论则被界定为研究控制论这门科学中能够直接用在控制系统工程设计的那些部分，它除了应当包括伺服系统工程实际的内容之外，更深刻更重要的在于作为技术科学，应把工程实际中各种原理方法整理总结成为理论，以显示其在不同领域应用中的共性，以及许多基本概念的重要作用，它的重点在于理论分析，而不是系统部件的详细构造和设计问题。作为技术科学，工程控制论使我们可能以更广阔的眼界、更系统的方法来观察有关的问题，从而得到解决老问题更有效的新方法，并揭示新的前景。



2) 承前启后。从理论结合工程实际的角度极其精炼地介绍了从应用拉普拉斯变换和传递函数概念解决线性常系数反馈伺服系统问题到非线性、变系数、时滞、多变量解耦（自治）、交流伺服、采样（离散时间）系统、自寻最佳点、噪声过滤和最速开关控制，以及自行镇定超稳定性和可靠性设计等当时最新甚至超前的研究成果。处于“古典（传递函数，频域法）”和“现代（状态空间）”控制理论的转折，起到承前启后的作用。随着工业、国防等方面不断提出新的技术需求，以及电子计算机的日益广泛应用和数学理论方法的发展，钱学森于1961年建议由关肇直、宋健等组织现代控制理论讨论班，引导了一批青年学者投身这一领域，使我国控制理论研究能较快赶上世界潮流。1980年与宋健等人共同完成的《工程控制论》中文修订版^[3]，更完整地反映了近期的进展，特别是中国学者的工作。

3) 综合集成。钱学森在对维纳的控制论、香农的信息论、贝塔朗菲的一般系统论、冯·诺依曼的博弈论以及信息论、系统论等基本肯定的同时，也指出其简单化的倾向。书中就其精华所做的精辟概括及突出强调贯穿全书的技术科学方法论，具有重要的指导意义。特别是他明确给出控制论在系统科学体系结构中的定位以及复杂巨系统及其从定性到定量的综合集成方法论，为这类重要系统的建模、分析、运筹和控制问题提供了理论和方法论的依据。

3、从现代控制理论、大系统理论到复杂系统及其控制理论

由于维纳控制论比较抽象的内容和比较广阔的思想，它与控制工程有一定的距离。在1978年纪念《控制论》发表30周年之际，国外曾征文以最短的篇幅阐明控制论的实质内容。对此我们也

曾进行思考并提出若干自己的看法。

实际上，控制论的基本问题，即如何对系统施加控制作用使其表现出预定的行为，并不等于按其数学模型由预定轨道解一个“反问题”以求出控制输入这样一个数学的问题。关键在于存在各种不确定因素（uncertainty），任意小的误差或噪声干扰若处理不当就可能导致严重的后果。因此，反馈系统要比开环系统强；稳定性的频率判据要比代数判据更接近实用；系统的结构和参数存在误差或发生变化时，为使系统保持良好性能，就需要研究系统对这些变化的灵敏度或鲁棒性问题；当存在噪声等随机不确定性时可以用统计滤波等方法；而当系统特性变化缓慢时可以采取自适应、自校正等方法跟踪这些变化；若存在主观的不确定性或知识不足时，又可以利用模糊控制、智能控制等技术；如此等等。可以概括地说，控制理论的所有概念、方法和内容都可归结为针对某种不确定性而使系统保持预定的品质。包括大系统、复杂系统和复杂巨系统的控制，要解决的也是由于“大”和“复杂”而无法用还原论方法进行微观处理所带来的不确定性问题。用这条线索可以把整个控制论串起来。对于非控制专业人员，由此也不难理解控制论的基本思想、理论和方法论。

工程控制论在各方面得到了广泛的应用。20世纪40、50年代用于船舶、火炮等机电系统操纵的伺服（随动）系统理论和技术已发展得比较充分，并在工业、国防中发挥重要作用。60年代前后由于火箭和航天技术的需求和支持，加上计算机技术的进步，发展了基于状态空间描述的多变量控制系统分析和设计理论，以极大值原理和动态规划为代表的最优控制和最优化理论，卡尔曼滤波和随机最优控制理论，非线性系统分析的状态空间方法，以及用于工业和国防的自适应和

自校正控制系统理论等等。以上述内容为主的现代控制理论曾经得到充分的支持和蓬勃的发展,并在1968年美国阿波罗成功登月中起到了很好的作用。这里的许多理论和技术在《工程控制论》中均已做了总结和概括。有趣的是,由于大功告成,美国航天局撤消了对这方面的大量支持,解聘了许多雇员,迫使他们转向工业、生物医学、社会经济等新的应用领域,以寻求新的发展和支

持。使人感到意外的是:他们引以为豪的那些“交会对接”、“软着陆”等高精尖技术并没有很快找到用武之地或起到立竿见影的效果。那些新领域的对象和问题比较含糊、多变,难以描述,或者规模大、变量多,无法一揽子处理。许多问题事实上也不必动用那些昂贵、精密的仪器和设备。与此相应地倒是发展了大系统、模糊性理论、智能技术等新的方向,开辟了新的思路。在1980-1981年《工程控制论》修订版[3]中增加了5章新的内容:最速控制系统、分布参数控制系统、逻辑控制和有限自动机、信号与信息,以及大系统理论,也部分地反映了这种情况。

国外在这一时期也出版了几种以“工程控制论”为题的著作,如乌克兰的伊瓦赫年柯(1962年)等,主要介绍了有关自适应、自校正、自学习、变结构、极值控制等方面的一些新结果;美国R.M.Glorioso的《Engineering Cybernetics》(1975,1983年)则侧重于智能系统方面的概念,与工程应用都有较大的距离。实际问题要考虑更多的约束因素,这比理论更加复杂。但同时也由于问题的特殊性而使人得到启发,找出解题的办法。只有通过结合实际的研究,才能不断地有所发现、有所前进。这也是钱学森教授经常对年轻人的谆谆教导。

4、系统工程和系统科学

1978年,钱学森、许国志、王寿云在《文汇报》上发表文章^[4],推动了系统工程在中国的发展和应用。作为系统科学工程应用层次与自动控制并列的学科分支,系统工程在我国的发展和取得的成就是有目共睹的。对于控制论来说,一方面,系统工程从管理的角度为控制问题明确指标、分配资源、规定约束,以求达到全局的目标和均衡;另一方面,系统工程涉及到的人、物、事的全面协调,人类决策和对人的管理,各类“事件”的安排、调度等原属运筹学的内容也进入了控制领域。同样,系统动态演化过程,信息反馈和调度控制的概念,特别是离散事件和混杂系统控制等前沿分支,也自然地进入了系统工程。同时在系统工程领域,根据问题的不同,采用不同的模型和技术方法进行综合集成,已被公认为基本的方法论。

尽管系统工程领域早已开展了方法论的研究,Hall、Wymore、Sage等人也都发表了专门的论著,但他们多限于简单地把它看成一个过程、一种使用方法的方法,等等。韦氏大辞典中词条“methodology”释义为“用于科学、艺术或条律的方法、程式、法则,假定及工作概念的总体”,“用于解一个问题或做一件事的一组过程、技术、途径,一个特定的程式或一组程式”,似乎说得还更清楚些。但相比之下,钱学森等人1978年关于系统工程方法论的提法更加全面,更适用于我们的问题,更具可操作性。

作为对照,若干年后著名的国际应用系统分析研究所(IIASA)曾在1980年组织过一次对于系统工程的反思的讨论会。他们也谈到了需要一个坚实的方法论的基础,传统的还原论方法已不适用并特别强调要从实际需求出发并运用经验知识等等。其文集出版于1984年,这也说明了我国

在这方面工作的正确性和先进性。

1985年,钱学森在“大系统理论要创新”^[5]的讲话中指出,大系统理论属于技术科学,要注意利用知识和经验,并接受基础层次的系统学的指导。此外还建议结合国家宏观社会经济问题组织交叉学科合作研究。

1986年在系统学讨论会上,钱学森多次明确提出了系统科学的体系:与哲学联系的系统论,基础层次的系统学,应用基础或技术科学层次的控制论和运筹学等分支,以及控制工程和系统工程等直接用于解决实际问题的工程技术层次的内容。其后又将其总结为“开放的复杂巨系统综合集成方法论”及其在各方面实际应用的学科体系。以上表明,30多年来钱学森先生从工程控制论到系统科学体系的形成,再次明确了控制论在其中的地位,实现了一次重大的飞跃。

5、控制理论面临的挑战及其未来的发展方向

系统和控制科学的这一飞跃归根结底来自对复杂性和复杂系统的认识。将这种认识用于改造世界,人们在实践中遇到了更多的复杂性问题的挑战,并逐渐深化了对于复杂系统、复杂巨系统的控制问题的认识。应当说这是当前科技发展的趋势,也是国际控制界近年的热门话题。钱学森早在1986年就指出了控制论和自动化在社会生产、科技进步和人类文明建设等各方面的重要作用,并把控制论纳入复杂系统和复杂巨系统研究框架的思路。有趣的是,国内外控制界紧随其后也掀起了一股研讨自动控制面临复杂性问题的重大挑战,亟需寻求新的思想、方法和工具的研讨热潮。从中亦可看出钱学森对控制论发展趋势的预见性,具有重要的理论和实际意义。

1986年9月美国IEEE和国家科学基金会邀请

52名各国专家举行了一次关于“对控制的挑战”的研讨会。在回顾自动控制在航天航空、通讯网络、制造系统等科技领域中的重要作用之后,他们指出了目前控制科学面临的一系列挑战问题,诸如:未能完善建模或需要在运行中不断改进模型的系统;由突发事件驱动引起离散状态转移的各种模型描述的系统,它们需要与传统动态系统有本质不同的处理办法,也更接近计算机和逻辑控制的实际过程;鲁棒、自适应和容错控制;随机、非线性和分布参数控制问题;信号处理和通讯中的控制问题;分布式信号处理和决策机制问题;系统集成、实验及其技术实现;以及人和机器在更高层次上和谐交互的问题等等。

1988年美国工业和应用数学协会(SIAM)组织专家研讨提出了“控制理论的未来方向”的调研报告。报告指出控制理论需要内容丰富的数学工具,并综合应用于建模、分析、计算和实验各方面。当前的挑战问题可概括为:非线性、多变量和分布参数的许多基本理论问题;机器人、加工系统和空间技术提出了许多新的挑战问题;日显重要的实验研究不仅用于建立面向控制的模型,也用于检验新控制范式的有效性;计算能力的迅速进步不仅可提供实时算法,也为开发新控制范式提供巨大的需求和机会。必须克服重视有形的硬件而忽略其中算法和理论的倾向,才能保持领先地位。

国际自控联(IFAC)理论委员会曾于1990-1993年组织关于“控制在工业中应用面临计算机的挑战”的调研,发表了总报告和14个工业项目调研分报告。这些项目包括钢铁工业、城市供水网络、汽车控制、生产调度、集成电路生产、垂直起落飞机、水力发电和城市供电管理、监控系统和故障诊断,以及柔性空间结构控制等等。其目的在于弄清其中控制论所起的作用,特别是由



于计算机扮演着越来越重要的角色,形成了对控制的挑战。在所统计的工业项目中,计算机的投入占60%以上,其中大部分为软件的费用。软件中应用软件又远大于系统软件,反映理论成果的“智能软件”只占软件投入的5%~10%。尽管应用领域不同,其共性问题是系统和软件的复杂性。典型的程序规模达百万条语句,瓶颈问题为大型软件的规范描述,编程实现和验证查错。离散事件和混杂动态系统的理论和计算机科学的最新成果将有助于解决这一问题。

《欧洲控制杂志》1995年曾就控制理论当前面临的挑战问题对专家进行问卷调查。普遍认为必须有新的应用、新的血液和新的研究问题,否则就要灭亡。其具体内容包括鲁棒控制、非线性系统、混杂系统、控制器和对象的集成设计以及系统/控制/逻辑/计算机的融合等等。特别值得强调的是计算机在其中的作用,它不仅是实现手段,而且近来发展的并行处理、矢量算法、自动编程、人机界面和CAD技术等,将为复杂系统控

制设计提供越来越方便的手段。

1996年在美国召开的“网络和系统的数学理论”国际会议的大会报告汇编《21世纪的系统与控制科学》中,强调运用新的方法论来解决诸如飞机设计、电路模拟、图像语音合成以及计算机视觉等各领域的问题。涉及的具体问题包括正系统理论(经济系统、马氏决策)、大变形弹性理论(合成橡胶动力学)、控制系统设计的数值方法研究、流形上的随机过程(用于计算机视觉)、非线性系统控制的新途径、集值映射、运动目标检测和视觉运动控制、风险敏感的马氏决策、自动目标重构算法,以及战斗机和导弹控制技术及其向工业的转移等等。

宋健教授于1999年在北京召开的国际自控联第14届世界大会所做的题为“21世纪的控制”的大会报告^[6]中指出:推动自动控制学科发展的主要动力仍然是物质生产和消费。系统的智能程度将提高,对智能和复杂性的定量刻画将是未来发展的紧迫任务。控制的应用范围今天已扩展到

制造工业、农业、航天航空和服务业,今后还将发展到金融业、生活及企业经营的计算机和智能化、机器人和外太空探索等。前沿科学领域如分子生物学、人类基因破译也都要用到系统和控制科学的概念和方法。具体前沿课题包括:非线性(微分流形/辛流形方法)、离散事件系统、分布参数系统、鲁棒控制、自适应/自校正/自组织和容错控制等等。

以上国内外学者共同关注的问题和许多具体深入的观点再次体现了钱学森在《工程控制论》中提出的技术科学方法论,特别是近年关于系统科学学科体系和复杂巨系统综合集成的理论,对当代科技发展仍然具有重要的指导作用。

6、控制问题的特殊复杂性^[7,8]

对于复杂系统控制问题的特殊复杂性,即所谓复杂控制问题,我们也给予了充分的重视。这是因为除了控制对象的复杂性外,技术工具的进步如半导体微电子学、光学和光电子学,计算机和通信网络等信息采集、存储、传输、计算和处理技术的迅速发展,也强力推动着自动控制等具有明确的“改造世界”特征的那些学科分支的发展。这些技术工具反过来又给系统带来了新的复杂因素,提出了新的复杂性研究问题。人们认识到,在控制问题中除了被控系统本身的复杂性外,还要考虑许多新的复杂因素。这种复杂控制问题可以看成几方面复杂性的综合:

- 1) 被控系统的复杂性。大规模、非线性、多层次、多子系统、不确定性、人机交互及高复杂度的离散变量,须用不同模型描述等等;
- 2) 系统环境的复杂性。噪声、干扰、环境变化或未知(海底,外太空)及部件失灵等等;
- 3) 控制器的复杂性。传感、执行、计算机本身、互连网上的控制、对系统本身特性的影响

(例如传感器、执行器的安放问题)及人机交互问题;

4) 控制问题本身的复杂性。系统设计的目标(过高或过低)、性能和费用的折中、多目标优化及多人合作或冲突环境中行为的不确定性。

由于这些复杂因素的错综复杂的影响,复杂控制问题具有极大的挑战性,因此,智能化的方法是不可避免的。

关于智能,这里仅限于智能技术的应用方面。概括地说,智能技术总是由于问题过于复



杂, 无法或不值得花大力气精确处理, 因而可采用一些近似的、经验的办法, 以给出某种满意的解答。它是经验规则的总结和应用。由于可用计算机帮助处理大量数据, 可以在一定范围内做得更快更好, 事实上这就是最常见的一种智能化的途径。智能技术的大量研究在于对人类决策行为的分析和模仿, 它可以是规范式 (normative) 的, 或者是描述式的 (descriptive)。当具有多决策单元相互作用协同工作的情形, 将遇到多人决策和博弈论的问题。各单元拥有的信息多寡将强烈影响全局的结果, 这也是信息经济学的基本问题之一。

7、21 世纪信息科技与控制论

当今人类已进入信息时代。系统与控制科学技术无论在改造人类主客观世界, 还是在信息社会的国际竞争中, 都具有关键的作用。它关系到国家乃至全人类的命运。正当地球上物质和能量资源日趋衰竭之时, 信息资源及其处理能力仍以每一两年翻一番的势头迅速增长 (摩尔定律), 这种趋势对系统与控制科学提出了挑战。

系统与控制科学旨在运用信息技术的最新成果, 延伸人的信息获取、处理和决策控制的能力, 解决人类社会面临的紧迫问题, 达到改

造世界的目的。人类当前面临的重大问题涉及自然探索、高新科技发展、物质财富生产、国防尖端和基础设施建设、社会管理和经济贸易、全球问题乃至人类自身行为和智能活动等方面。其中无论人的因素、客观对象, 还是以计算机和通信网络为代表的各种技术工具, 都是十分复杂的, 它们之间相互作用形成的复杂系统控制问题正是当前控制科学的主要课题。

与其他学科分支相比, 系统与控制学科的发展更多地受到实际问题的推动和启发, 也受到半导体、光电子技术、通信、计算机等相关学科的强烈影响, 诸如关于知识和智能的研究、控制系统仿真和 CAD、基于通信网络或 Internet 的分布式控制系统等等, 它们将为复杂系统和复杂巨系统及其控制问题的研究不断提供强大的需求推动和技术支持。这对于新时代系统与控制科学的发展既是挑战, 也提供了无限生机。

8、结束语

控制论通过对系统运动规律的认识, 能动地运用有关的信息并施加控制作用以影响系统运行行为, 使之达到人类预定的目标。控制论是系统研究中最接近实际应用的学科分支, 特别具有改造世界的品格。钱学森的工程控制论首先解决了一批工程实际中的控制论问题, 并在不断探索各种复杂性层次系统运动规律的基础上, 密切结合我国国防和政治、经济建设的需要, 提出和解决了大系统、复杂系统和复杂巨系统的组织管理和控制中的大量理论和实践问题。由于他渊博的知识、科学的世界观和丰富的实践经验, 从文中介绍的发展现状可以看到他在控制论方面的贡献明显高于国内外同行。

继承钱学森在控制论中开创的技术科学的学术传统, 结合我国国情研究系统科学多层次的集



成体系，形成从基础科学到工程应用的、实证的系统与控制科学技术体系，可能还需要几代人的献身努力。这一过程必将对我国和全人类做出重大的贡献。

参考文献

- [1] Tsien H S.Engineering cybernetics. New York: McGraw-Hill, 1954.
- [2] 钱学森. 工程控制论. 戴汝为, 何善译. 北京: 科学出版社, 1958.
- [3] 钱学森, 宋健. 工程控制论 (修订版) · 上、下册. 北京: 科学出版社, 1980—1981.
- [4] 钱学森, 许国志, 王寿云. 组织管理的技术——系统工程. 文汇报 (上海), 1978-09-27(1, 4).
- [5] 钱学森. 大系统理论要创新. 系统工程理论与实践, 1986(1): 1.
- [6] 宋健. 21世纪的控制. 国际自控联 (IFAC) 第14届世界大会论文集. 北京, 1999.
- [7] 黄琳, 秦化淑, 郑应平等. 复杂控制系统理论: 构想与前景. 自动化学报, 1993, 9(2):129-137.
- [8] 郑应平. 复杂系统及其控制理论. 21 世纪初科学发展趋势. 北京: 科学出版社, 1996. 342-344.